

主要定期航路における減速航海によるCO2排出量及び輸送コスト削減に関する研究

著者	張 智?
学位名	修士(工学)
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2019
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00001898/

修士学位論文

主要定期航路における減速航海による
CO₂排出量及び輸送コスト削減に関する
研究

2019 年度

(2020 年 3 月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

海運ロジスティクス専攻

張 智鑫

目次

1. はじめに	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	3
1.3 論文の構成	4
2. 国際海運における環境問題及び対策について	5
2.1 国際海運の現状	5
2.2 国際海運における環境問題	8
2.3 国際海事機関の取り組み	9
2.4 ポセイドン原則	11
3. 研究対象	12
3.1 主要定期航路について	12
3.2 コンテナ船の大型化について	17
3.3 コンテナ・マーケットについて	19
3.3.1 船用燃料油価格推移	19
3.3.2 コンテナ船の待機船について	20
3.3.3 コンテナ・フリート	21
3.4 減速航海について	22
4. 計算モデルの定式化および感度分析	26
4.1 計算モデルの概要	26
4.2 必要隻数の定式化	27
4.2.1 1 サイクル時間の構成	27
4.2.2 必要隻数の算出式	29
4.3 CO ₂ 排出量の定式化	30
4.3.1 燃料消費量の算出式	30
4.3.2 CO ₂ 排出量の算出式	31
4.4 輸送コストの定式化	32
4.4.1 輸送コストの構成	32
4.4.2 輸送コストの算出式	33
4.5 用いるデータおよびモデルの係数設定	35
4.5.1 航路サービスのデータ	35
4.5.2 モデル係数の設定	37
4.6 モデルを用いた感度分析	39
4.6.1 大型化による感度分析	39
4.6.2 減速航海による感度分析	42
5. 主要航路における減速航海への考察	45

5.1 各航路の特徴について.....	45
5.2 隻数の増加による減速航海.....	49
5.2.1 大型化による隻数増加の減速航海.....	49
5.2.2 待機船舶の投入による減速航海.....	55
5.3 航路の1サイクル余裕時間の考察.....	58
5.3.1 主要航路の余裕時間について.....	58
5.3.2 余裕時間による減速航海.....	59
5.4 停泊時間の短縮への考察.....	61
5.4.1 荷役時間の短縮による減速航海.....	61
5.4.2 入出港時間の短縮による減速航海.....	66
5.5 考察のまとめ.....	68
6. おわりに.....	70
6.1 本研究のまとめ.....	70
6.2 今後の課題.....	71
謝辞.....	72
参考文献.....	73

1. はじめに

1.1 研究背景

現在、地球温暖化が問題となっている。2018 年の CO₂（二酸化炭素）排出量は 2017 年と比べて 1.7% 増え、過去最高の約 331 億トンに達したことが IEA（国際エネルギー機関）の報告書で明らかになった。その中でも国際海運における CO₂ 排出量が 8 億 4,300 万トンと地球全体の CO₂ 排出量の約 3% を占め、これはドイツ国分に相当することを IMO（国際海事機関）が発表した⁽¹⁾。さらに、世界の海上輸送量と船腹量の推移を見ると、両方とも増加傾向にある。今後、開発途上国を中心とした世界経済の成長によって、国際貿易量が急増することが見込まれる。それに伴い国際海運における CO₂ 排出量も増加すると考えられ、国際海運において CO₂ 排出量の削減は重要であると言える。

2004 年に発効された「気候変動枠組条約京都議定書」では、先進国に対し、2008～2012 年の GHG（温室効果ガス）排出量を国により 1990 年比で 0～8% 減とするよう求めているが、国際海運は対象外となっている。IMO が国際海運における GHG 排出量削減を、GHG 排出量の抑制を追求している。IMO では 2011 年 MEPC（海洋環境保護委員会）62 において、2013 年以降に建造される船舶に対する EEDI（エネルギー効率設計指標）の導入とこれに基づく燃費規制を実施するとともに、現存船舶を含むすべての船舶を対象に省エネルギー運航計画 SEEMP（エネルギー効率管理計画）の作成が義務付けられた。また、2015 年に全ての国が参加するのを目標とする、2020 年以降の GHG 排出削減などの新たな国際的枠組みとして、「パリ協定」が採択された。そのため、2018 年に GHG 中長期削減目標を採択し、今世紀中可能な限り早期に GHG のゼロ排出を目指すこととなった。2019 年 5 月開催の MEPC74 では、全船舶の GHG 排出量の約 4 分の 1 を占めるコンテナ船のうち、特に排出量が多い大型コンテナ船を中心に 2022 年までにエネルギー効率設計指標（EEDI：2013 年発効）の燃料規制値を従来の 30% から 40% に引き上げ、燃料消費量の削減を強化することになった。

GHG 排出量の抑制対策について、IMO は第 1 段階としてハード面で省エネ（CO₂ 排出性能）規制を開始した。具体的には新造船及び既存船への省エネ付加装置を設置することや LNG 燃料船の建造などの技術面で船舶の GHG 排出性能を向上させることである。第 2 段階として、新造船や既存船を問わずソフト面で運航的手法を促進するとともに、燃料消費実績報告制度（2019 年 1 月開始）を策定することで、燃料消費量等の運航データを可視化し、更なる削減対策を検討した。具体的な削減対策は、減速航海による速度最適化や船隊マネジメントの改善、ウェザー・ルーティングなどが挙げられている。その対策の中に、リーマン・ショックによる収支改善に向け海運業費用の多くの部分を占める燃料費削減のための減速航海が 2009 年より欧州大手海運会社を筆頭に開始された。

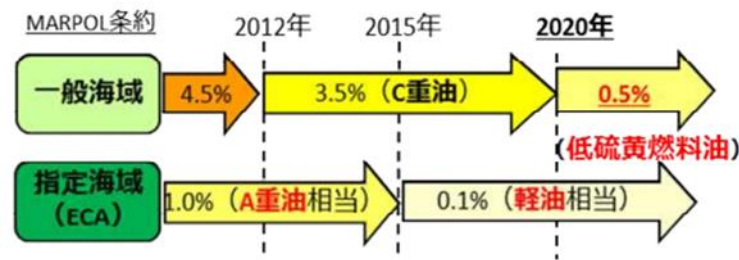


図 1.1 船舶用燃料油の規制 ⁽²⁾

図 1.1 に示したように燃料油について、従来船舶が C 重油を燃料として使用していた。しかし、海洋汚染防止条約（マルポール条約（MARPOL 条約））の改正により 2020 年 1 月 1 日以降に使用する燃料油中の硫黄分濃度の規制値が従来の 3.5 質量%以下から 0.5 質量%以下に厳しくなり、石油製品の価格高騰や入手リスクが高まっている。北欧、北米、およびアジアの一部における排出規制海域（ECA）では、硫黄含有量が 0.1%以下のよりクリーンな燃料の使用が必須になった。このような低硫黄燃料はさらに高価である。また、国際海運会議所（ICS）をはじめとする海運業界 8 団体は、2018 年に IMO で合意された 2050 年までの GHG 半減目標に向け、新たな CO₂削減技術を開発するため研究開発組織である IMRB（国際海事研究開発理事会）を新設することを決定した。その必要資金として、世界の海運会社が購入する船舶燃料 1 トンにつき 2 ドルを徴収して、10 年間に 50 億ドルを徴収する予定である。このように燃料油の高騰によるコスト増加はコンテナ輸送と運賃の全体的な価格体系に大きな影響を与えるだろう。

以上の状況を踏まえて、減速航海の実施から 10 年以上経つが 2020 年に開催される次回海洋環境保護委員会において、IMO で合意された 2030 年までの船舶から排出される CO₂削減目標の実現に加え、2023 年までに実施する短期的な対策に合意することが極めて重要である。また、減速航海による燃料消費量の削減効果は大きいと、引き続き力を入れると考えられる。

1.2 研究目的

先程述べたように国際海運におけるCO₂排出量の削減は必要であり、その為に既存研究では国際海運におけるCO₂排出量の推定、減速航海等のCO₂排出削減の効果の推定等が行われてきた。しかし、既存の研究においてはCO₂排出量の削減策別の効果についての計算をしているが、主要定期航路の船舶大型化に進んでいることで、CO₂排出量削減に対する最も有効な対策の1つとする減速航海へ影響の検討を行っていない。特に各航路の大型化状況が異なるため、それを考慮した上で減速航海の削減効果を検討することが必要である。

また、減速航海の既存研究については減速した場合に船舶主機やエンジンなどの機関各部への悪影響に対する対策の研究が多い一方、船舶の大型化に伴う港の制限による入出港待ちや荷役作業時間の増加が減速航海の効果に与える影響の検討が少なく、研究が不十分である。さらに、高野（2009）の研究⁽³⁾では50%程度の減速航海を環境、船社及び荷主3つの目面で評価したが、航路サービス性を維持した減速航海については評価していない。

そこで、本研究では主要定期航路を対象として各航路の現状を考慮した上で、減速航海によるCO₂排出量及び輸送コストの削減効果を手法別（①サービス航路設計上の余裕時間②必要隻数の増加③停泊時間の短縮）で検討する。また、2つ目の手法は航路の大型化による隻数増加と待機船舶の投入に分かれ、3つ目は荷役時間の短縮と入出港時間の短縮に分かれる。最後に環境面とサービス提供するオペレーター（海運会社）及びサービス利用する荷主の3つの視点で評価する。

1.3 論文の構成

本研究の構成について説明する。

第1章「はじめに」においては、研究の背景、研究目的、論文の構成について述べる。

第2章「国際海運における環境問題及び対策について」においては、国際海運における環境問題について述べる。また、国際海事機関（以下略称 IMO）のそれに対する抑制対策を示す。さらに、海運業界の脱炭素化を進めるために、金融業界の「ポセイドン原則」を示す。本章では、国際海上輸送に対する CO₂排出削減の重要性について説明し CO₂排出削減に対する先行研究を示す。

第3章「研究対象」においては、国際海運における主要定期航路の現状とコンテナ船舶の大型化動向を示す。また、燃料油の価格やコンテナ船の需要などのコンテナ・マーケットの現状及び減速航海の現状を示す。

第4章「計算モデルの定式化及び感度分析」においては、本研究モデルの詳細を説明する。また、モデルを用いた感度分析について説明する。

第5章「主要航路における減速航海への考察」においては、第4章に説明したモデルを用いて、3つの手法（①サービス航路設計上の余裕時間②必要隻数の増加③停泊時間の短縮）による減速航海の考察結果を述べる。最後に環境面とサービス提供するオペレーター（海運会社）及びサービス利用する荷主の3つの視点でまとめる。

第6章「おわりに」においては、本研究の結論をまとめる。具体的には、本研究のまとめ、今後の課題について述べる。

2. 国際海運における環境問題及び対策について

2.1 国際海運の現状

① 国際海上輸送量

1990 年の始めに世界経済の発展に伴いグローバル化が進み、製造業は国を超えたサプライ・チェーン・マネジメント（Supply Chain Management）やジャスト・イン・タイム（Just in time）といった物流体制を構築することで⁽⁴⁾国際海上物流に大きな影響を与えた。図 2. 1. 1a に世界海上輸送量と船腹量の推移を示したように、世界の海上輸送量が年々増加している。それに伴って海上輸送を担う船舶の船腹量も増加している。

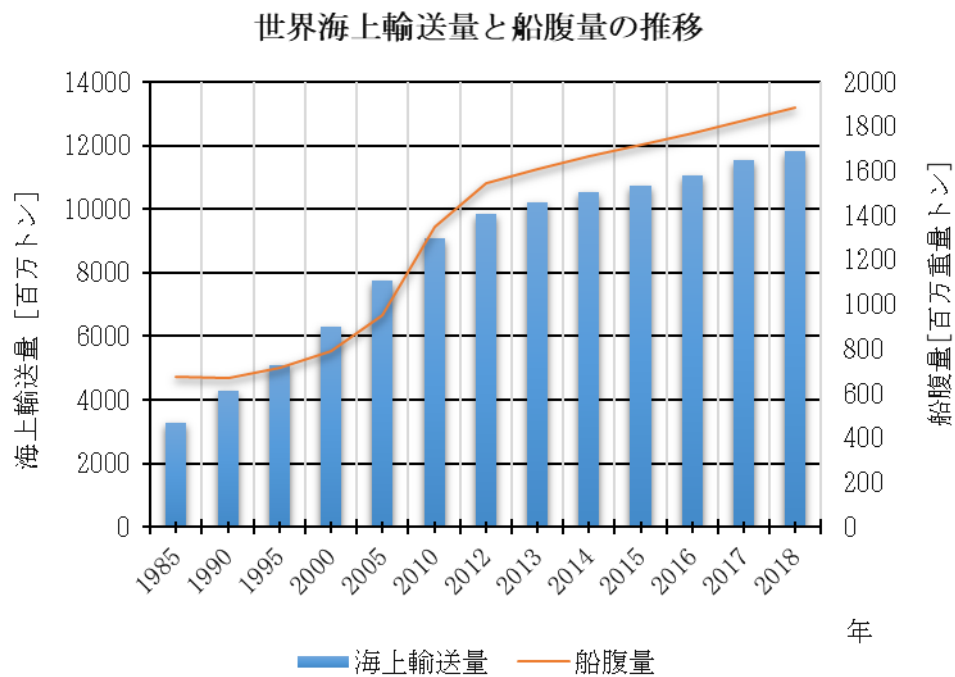


図 2. 1. 1a 世界海上輸送量と船腹量の推移⁽⁵⁾

② 世界の船種別船腹量

表 2. 1. 1b に世界の船種別船腹量を示す。ばら積乾貨物船、オイルタンカー、コンテナ船の順となっている。

順位	船種別	万総トン	構成率(%)
	世界合計	129,105	100%
1	ばら積乾貨物船	43,516	34%
2	オイルタンカー	26,619	21%
3	コンテナ船	22,467	17%
4	旅客船・RORO 船等	9,067	7%
5	液化ガス船	7,125	6%
6	ケミカル船	6,671	5%
7	一般貨物船	5,291	4%
8	油・貨兼用船	137	0%
	その他	8,212	6%

表 2. 1. 1b 世界の船種別船腹量 (2017 年末) ⁽⁵⁾

③ 世界のコンテナ荷動き

日本海事センターの研究 ⁽⁶⁾ によると、世界経済とコンテナ輸送の関連性が高く雑貨、原材料、製品の輸送まで幅広くコンテナ輸送を活用している。図 2. 1. 1c に世界コンテナ荷動きの推移を示す。実用的コンテナ船が世界に初めて登場したのが 1956 年、大西洋航路への初就航が 1966 年、そして 1970 年代に世界の主要定期航路がコンテナ化されコンテナによる海上輸送システムの進歩に伴う海上輸送量も増加し続けている。図 2. 1. 1c で示したように、世界海上輸送量の増加に伴いコンテナ荷動きも増加し続けている。2008 年秋のリーマン・ショック後の世界不況により 2009 年に一度に減少し、2009 年後半から徐々に持ち直し、2010 年は 2008 年を上回るまでに回復した。これからも世界経済に伴い、伸びていくと考えられる。

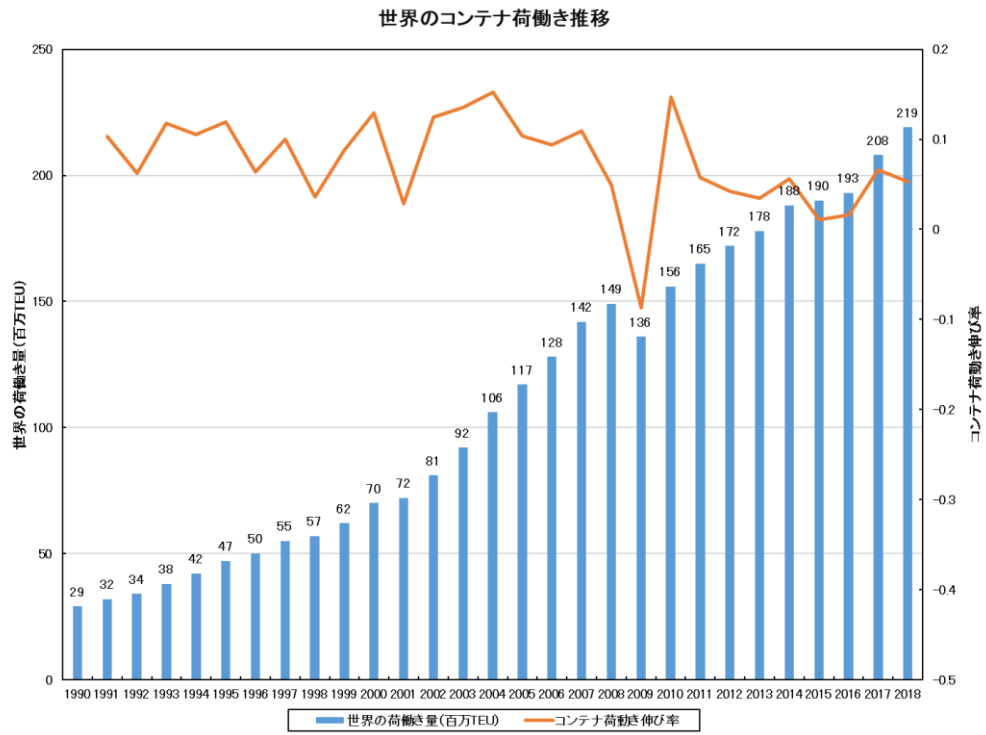


図 2.1.1 c 世界コンテナ荷動き推移⁽⁷⁾

2.2 国際海運における環境問題

ここでは、図 2.2 に海上輸送における環境問題を示す。

海上輸送を行う際に、環境に与える負荷は大気と海洋の二種類がある。大気環境に影響する物質には、二酸化炭素（Carbon Dioxide :CO₂）、窒素酸化物（Nitrogen Oxides :NO_x）、硫黄酸化物（Sulfur Oxides :SO_x）、メタン（CH₄）、一酸化炭素（Carbon Oxide :CO）、亜酸化窒素（Nitrous Oxide :N₂O）、揮発性有機化合物（Volatile Organic Compounds）、非メタン揮発性有機化合物（Non-Methane Volatile Organic Compounds :NMVOC）、微粒子物質（Paticulate Matter :PM）などがある。

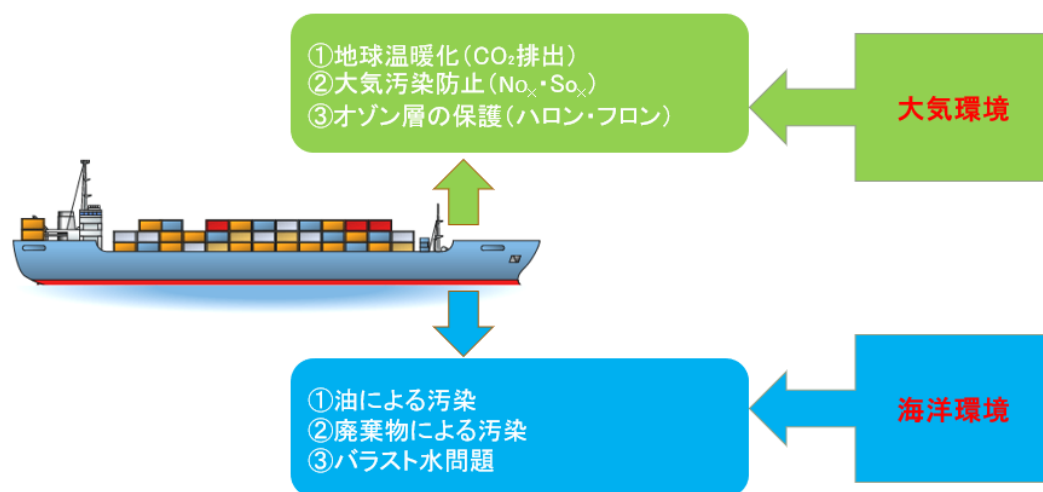


図 2.2 海上輸送における環境問題 ⁽⁷⁾

海洋環境の影響については船舶からの油流出、有害液体物質の排出、船内で発生する廃棄物の排出やバラスト水の移動による生態系影響などがある ⁽⁷⁾。現在、地球温暖化が問題となっており 1.1 節の研究背景にも述べるように、国際海運における CO₂排出量が多く様々な対策が重要である。表 2.2 に海運の CO₂排出量を示す。

Year	Global CO ₂ ¹	Third IMO GHG Study 2014 CO ₂			
		Total shipping	% of global	International shipping	% of global
2007	31,409	1,100	3.5%	885	2.8%
2008	32,204	1,135	3.5%	921	2.9%
2009	32,047	978	3.1%	855	2.7%
2010	33,612	915	2.7%	771	2.3%
2011	34,723	1,022	2.9%	850	2.4%
2012	35,640	949	2.7%	796	2.2%
Average	33,273	1,016	3.1%	846	2.6%

表 2.2 Third IMO GHG Study 2014 CO₂[MT] ⁽⁸⁾

2.3 国際海事機関の取り組み

ここでは、海運における環境問題に対する取り組みを述べる。

世界の海運業界では海洋や大気環境保全と取り組み、環境に優しい船舶の運航、省エネルギー対策、廃棄物対策、大気・水質・土壌環境対策、資源循環、環境技術の開発などを推進、2009年のポスト京都議定書の枠組みの合意を目指した地球温暖化対策がクローズアップされている。また、国際的あるいは各国単位など各種規制が行われ、船舶は全世界を活動領域としているため、環境保全には全ての海域、港湾を対象に様々な取り込みが必要とされる。このため、国際海事機関（International Maritime Organization :IMO）と呼ばれる国連の専門機関による海洋汚染防止条約（73/78MARPOL 条約）などの国際条約による規制、勧告など国際的な合意を基本とした取り組みが進められている。MARPOL 条約：正式名は、

（International Convention for the Prevention of Pollution from Ships）で、Marine Pollution の頭文字をとり MARPOL 条約と言われる。Bunker と呼ばれる船舶燃料油の燃料により生じた CO₂、NO_x、SO_x の排出、オゾン層破壊の元凶となるハロンガス、フロンガスの放出などによる大気汚染は、CO₂を除き 73/78MARPOL 条約の 1997 年議定書で規制されている。1997 年議定書は 400 総トン以上の船舶などに適用され、NO_x、SO_x、ハロン・フロン、VOCs といった船上焼却による排ガスを主に規制するものである。しかし、外航船は世界のあらゆる海域、港湾を対象とした規制が必要と判断され、国際海運における CO₂の排出抑制策は IMO を通じて検討することになった。

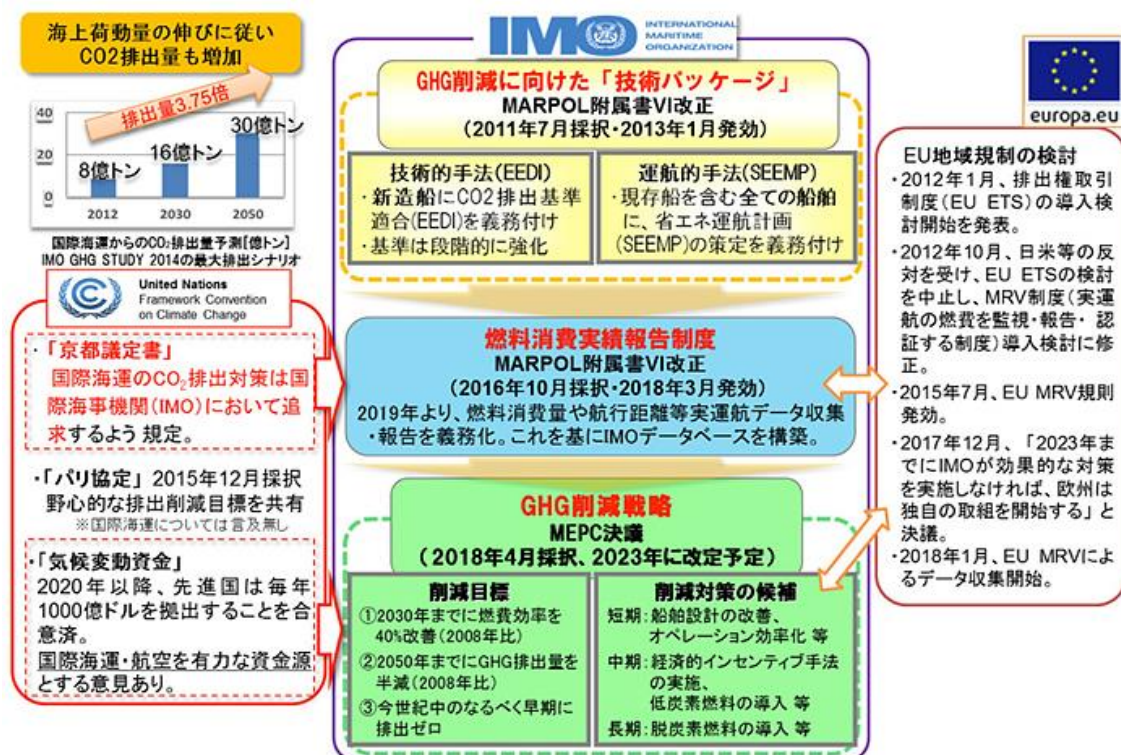


図 2.3 IMO の CO₂排出規制 ⁽⁹⁾

図 2.3 に示したように、IMO では国際海運における CO₂の排出を抑制するため 2013 年以降

に建造される船舶に対するエネルギー効率設計指標（EEDI）の導入とこれに基づく燃費規制を実施すると共に、現存船舶を含める全ての船舶を対象とした省エネルギー運航計画（船舶エネルギー効率管理計画 SEEMP）の作成を義務付けた。また、その規制に対して CO₂の排出抑制策は 2 つに分かれる。新造船のみのハードウェアを改良する技術的手法と全ての船舶に対する減速航海などのソフト面での運航的手法である。表 2.3 に手法例を示す。また、表 2.4 に IMO が GHG 削減に対する動きを示す。

技術的手法	内容
燃料の転換	船用燃料電池システムの投入
プロペラ効率の改善	実際の波浪に応じて、プロペラの最適化
船体抵抗の軽減	空気潤滑などのシステムによる燃費効率の改善
代替エネルギーの活用	天然ガスなど環境に優しい燃料の使用
運航的手法	
減速航海	運航船舶の速力最適化
北極海航路の活用	北極海による航海距離の短縮
ウェザールーチング	潮流、風波を考慮した最適ルートを選択

表 2.3 船舶における環境改善手法 ⁽¹⁰⁾

	GHG 削減戦略（初期戦略）を採択
2019 年 1 月	フェーズ 1：データ収集（船舶からのデータ報告制度開始）
2019 年春 (MEPC74)	第 4 回 GHG スタディを開始
2020 年夏	2019 年のデータを IMO に報告
2020 年秋 (MEPC76)	フェーズ 2：データ分析 第 4 回 GHG スタディ報告とりまとめ
2021 年春 (MEPC77)	2019 年のデータを IMO が集計・分析して発表 データ集計結果を踏まえ、IMO 戦略見直し作業を開始
2021 年夏	2020 年のデータを IMO に報告
2022 年春 (MEPC78)	フェーズ 3：対策の決定 2020 年のデータを IMO が集計・分析して発表
2022 年夏	2021 年のデータを IMO に報告
2023 年春 (MEPC80)	2021 年のデータを IMO が集計・分析して発表 GHG 削減戦略（改訂版）を採択

表 2.4 GHG 削減戦略 ⁽¹¹⁾

2.4 ポセイドン原則

米シティグループなどの国際的金融機関は IMO が 2050 年までに国際海運における CO₂排出量を 2008 年比で 50%削減するという目標に対し、金融面から支援するため「ポセイドン原則」を立ち上げた。賛同金融機関はシティの他、仏ソシエテ・ジェネラル、ING などの 11 金融機関。日本の 3 つのメガバンクにも参加を要請している。

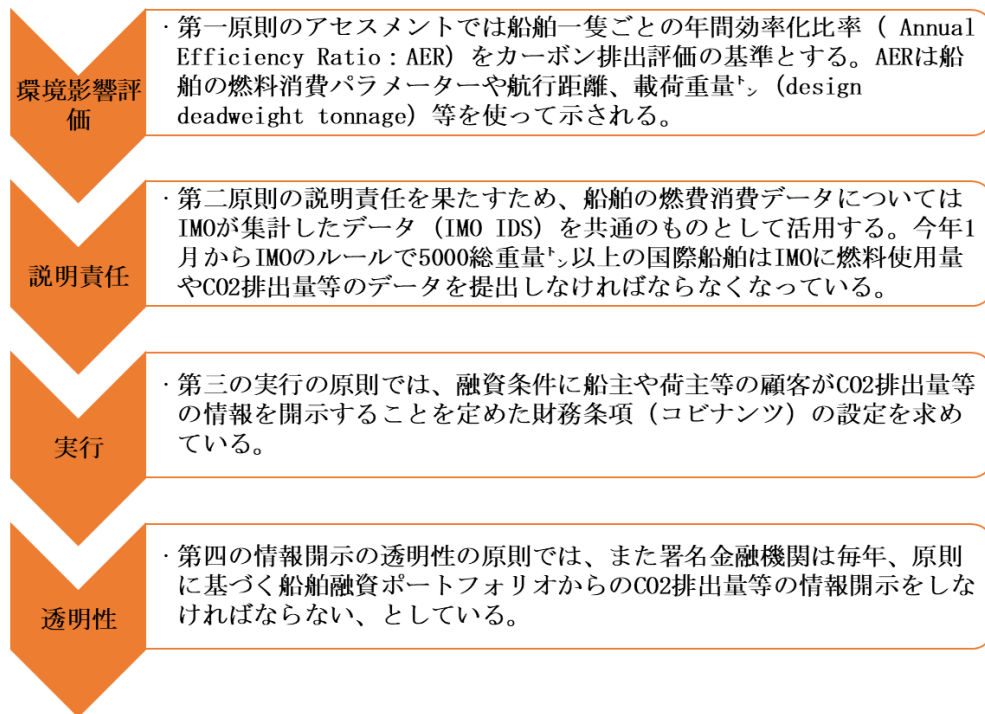


図 2.4 「ポセイドン原則」⁽¹²⁾

「ポセイドン原則」は「船舶向け融資（Ship finance）ポートフォリオを社会的ゴールに適合させる」ことを目的に、環境影響評価（Assessment）、説明責任（Accountability）、実行（Enforcement）、透明性（Transparency）の 4 項目の原則を掲げる。具体的な内容は図 2.4 に示す。つまり、「ポセイドン原則」を通じて金融業界が国際海運に投融資する際は環境面の影響も 1 つの評価項目になる。

3.1 主要定期航路について

World Container Estimated Movement in 2017

Total: 156,454,913 TEU 前年比2.1%増 単位：千TEU

World Container Estimated Movement in 2017

Total: 156,454,913 TEU 前年比2.1%増 単位：千TEU

欧州 Europe
中東 Middle East
アフリカ Africa
インド亜大陸 India, etc.
東アジア East Asia
北米 North America
大洋州 Oceania
中南米 Central & South America

作成：(公財)日本海事センター

図 3.1a 世界のコンテナの荷動き⁽¹³⁾

世界コンテナ定期航路の荷動き割合図

航路区分	割合 (%)
東アジア-北米航路	47%
東アジア-欧州航路	39%
東西主要航路	36%
東アジア域内	20%
南北航路	17%
東西その他航路	13%
他の地域内	14%

図 3.1b 世界コンテナ定期航路の荷動き割合⁽⁶⁾

図 3.1c のように、東アジアー北米航路が往復合計で 26,764 千 TEU、東アジアー欧州航路は合計で 23,073 千 TEU、欧州ー北米航路は合計で 7,321 千 TEU となった。

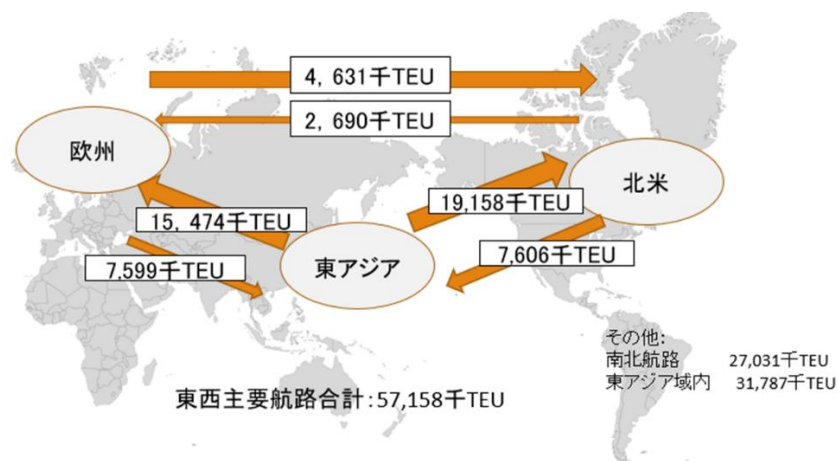


図 3.1c 東西基幹航路のコンテナ荷動き ⁽⁶⁾

① 東アジアー北米航路

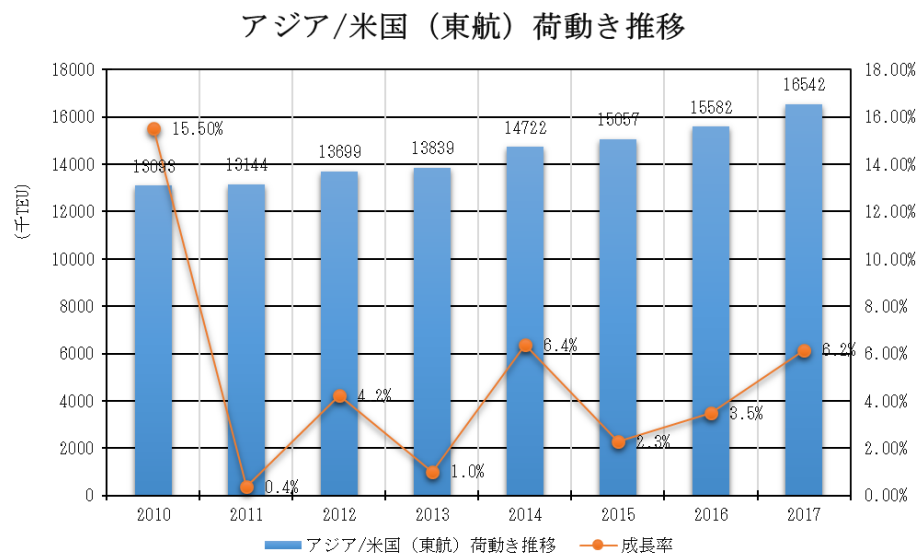


図 3.1.1a アジア/米国（東航）荷動き推移 ⁽⁶⁾

アジア/米国（東航）荷動き推移は、2010 年はリーマン・ショックの反動を受け年間荷動きは急回復したが、2011 年の成長率は 0.4% までに低下した。2012 年から成長率は 4.2% に戻り、2017 年まで荷動きが 16,542 千 TEU になった。

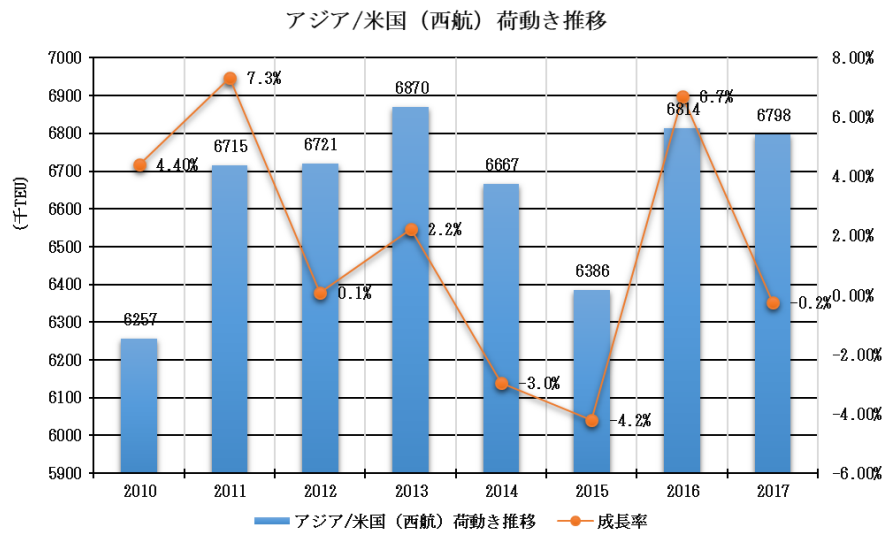


図 3.1.1b アジア/米国（西航）荷動き推移 ⁽⁶⁾

アジア/米国（西航）荷動き推移は、2013年に荷動きが最高 6,870 千 TEU になり成長率がプラスだった。2014 年と 2015 年は成長率がマイナスに低落し、2016 年に回復、2017 年に 6,798 千 TEU になった。

② 東アジア-欧州航路

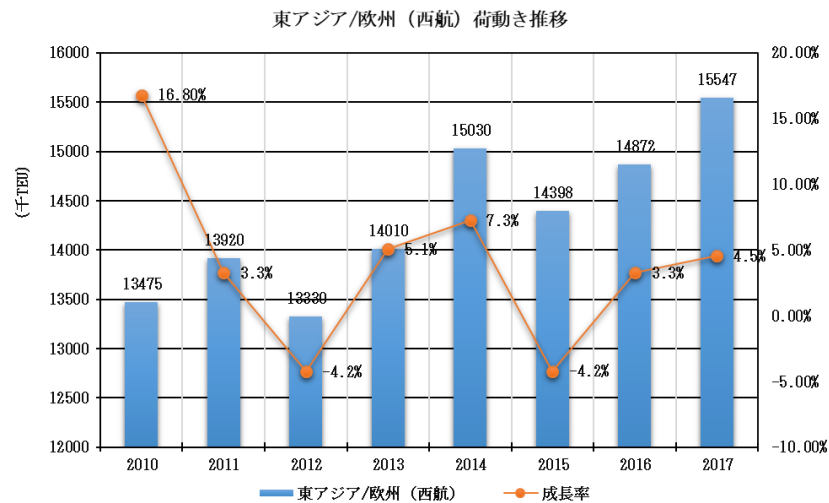


図 3.1.2a 東アジア/欧州（西航）荷動き推移 ⁽⁶⁾

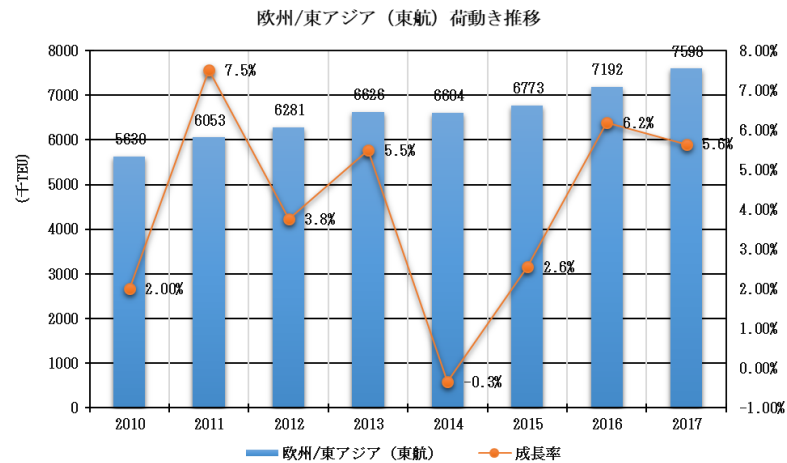


図 3.1.2b 欧州/東アジア（東航）荷動き推移 ⁽⁶⁾

東アジア/欧州（西航）荷動き推移について、2010 年はリーマン・ショックの反動を受け年間荷動きは急回復したが、2011 年は 3.3% 増と伸びが鈍化した。2012 年は欧州債務危機の影響を受け 3 年ぶりに減少し 4.2% 減となったが、2013 年は欧州の景気回復と共に 5.1% 増、2014 年はさらに伸長し 7.3% 増となり年間荷動きは過去最高となった。2015 年は前年の在庫調整やユーロ安およびロシアの景気後退の影響を受け 4.2% 減とマイナスになったが、2016 年は欧州の景気回復基調に転じ 3.3% 増、2017 年は 4.5% 増のプラスとなり荷動きが過去最高を更新して 15,547 千 TEU になった。

欧州/東アジア（東航）荷動き推移について、2014 年に成長率がマイナス 0.3% になったが 2010 年から 2017 年までの荷動き推移を見ると徐々に増加している。また、2017 年が最高 7,598 千 TEU になった。

③ 欧州—北米航路

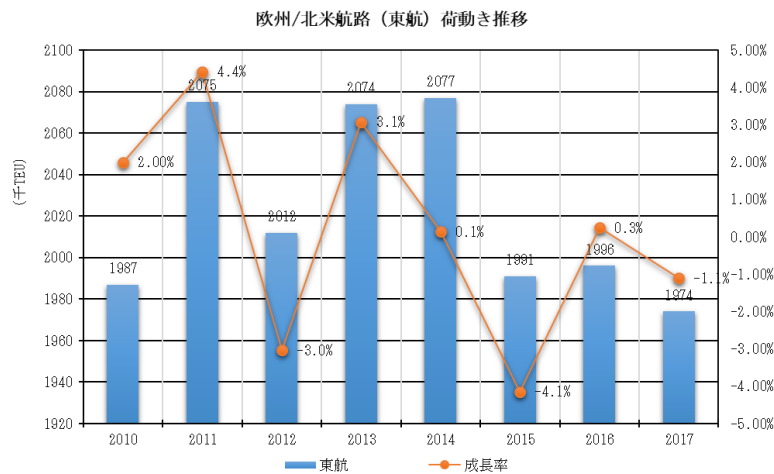


図 3.1.3a 欧州/北米航路（東航）荷動き推移 ⁽⁶⁾

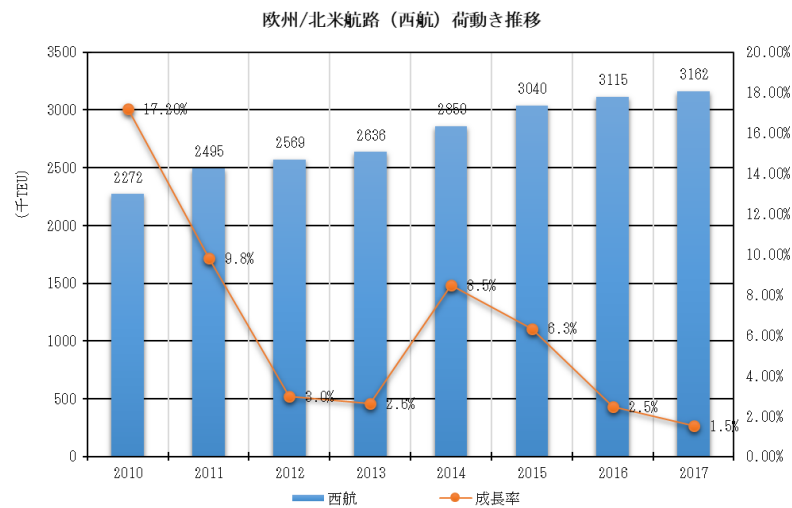


図 3.1.3b 欧州/北米航路（西航）荷動き推移 ⁽⁶⁾

欧州/北米航路（東航）の荷動き推移については、やや減少傾向になり 2017 年に過去最低の 1,974 千 TEU になった。西航については、2010 年から 2017 年までの成長率がプラスで、2017 年に過去最高の 3,162 千 TEU になった。

3.2 コンテナ船の大型化について

ここでは、コンテナ船を大型化に進んでいる状況を説明する。

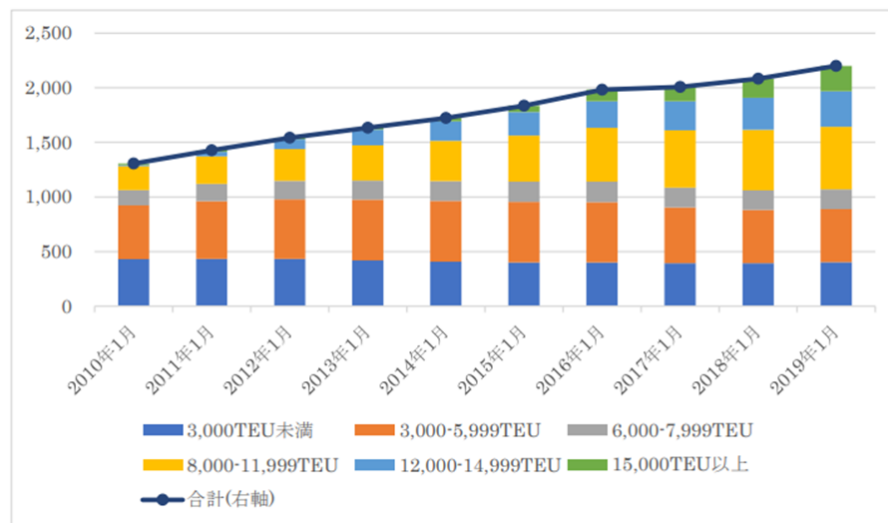


図 3.2.1 船型別の船腹量の推移 ⁽¹⁵⁾

コンテナ就航隻数および船腹量・平均船型

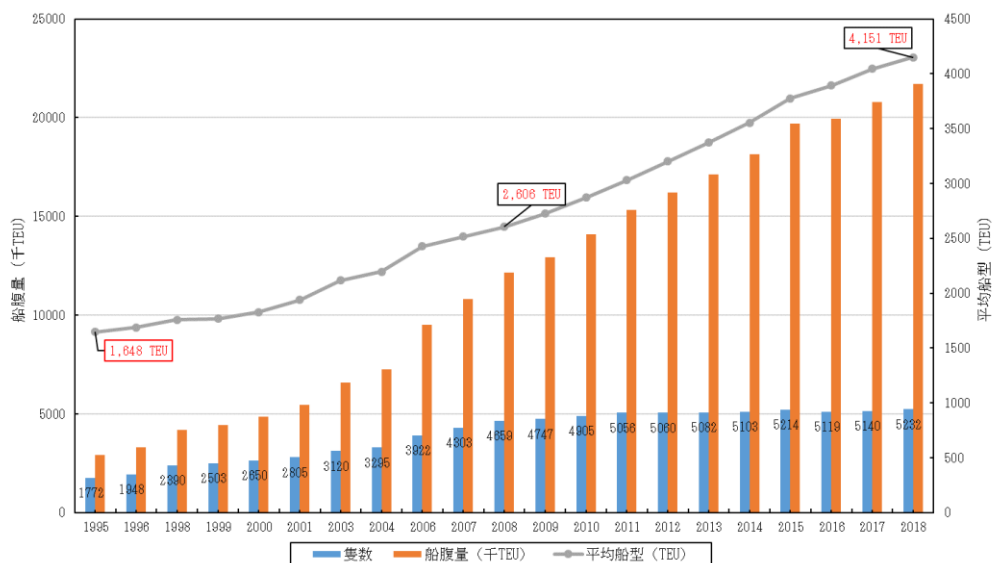


図 3.2.2 船型別の船腹量の推移 ⁽¹³⁾

図 3.2.1 に船型別の船腹量の推移を示す。世界で就航しているコンテナ船は 2019 年 1 月時点で、5,264 隻、船腹量は 2,201 万 TEU、2018 年比で 101 隻増加、116.6 万 TEU (5.6%) 増加した。増加の中心は 8,000TEU 以上の大型船舶である。一方で、8,000TEU 未満の船舶の船腹量は減少傾向になっている。また、図 3.2.2 に平均船型の推移を見ると就航船の平均船型が 1996 年の 1,689TEU から 2018 年の 4,151TEU に増加し、コンテナ船が全体的に大型化に進んでいることが言える。

図 3.2.3 にはコンテナ船新造船の平均船型の推移を示すものである。新造船の平均船型を見てみると、1990 年代初頭は新造船の平均船型は 1490TEU であった。それから次第に大型化

していき、2008 年リーマン・ショックなどの影響を受け、船社の利益は大幅に減少する。利益を確保するため、その後 2009 年からコンテナ船の新造船の平均船型は急激に増加し、2010 年に 5,097TEU を突破した。2017 年では、新造船の平均船型は初めて 8,000TEU を超えた。

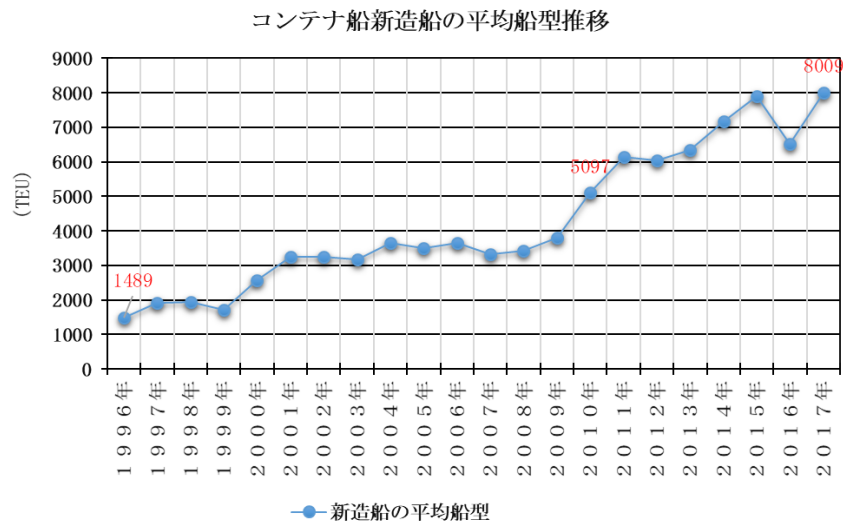


図 3.2.3 コンテナ船新造船の平均船型推移 ⁽¹⁵⁾

また、参考文献 ⁽¹⁵⁾ によると 2017 年は商船三井を皮切り、Maersk や COSCO (OOCL) が相次いで 20,000TEU の超大型船を竣工した。環境規制前の大量の駆け込み発注があった 2015 年の発注船の多くが 2018 年にかけて竣工するとも見られ、2018 年も超大型船を含む多くのコンテナ船が竣工すると予想される。

3.3 コンテナ・マーケットについて

3.3.1 船用燃料油価格推移

コンテナ船が運航する際に、燃料油は不可欠なものである。図 3.3.1 に 1994 年～2018 年 C 重油の平均価格を示す。

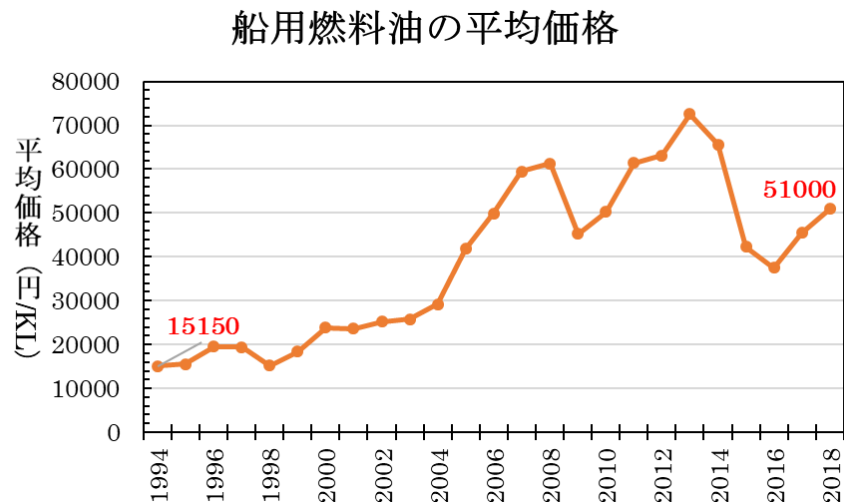


図 3.3.1 船用燃料油の価格推移 ⁽¹⁶⁾

1994 年の C 重油平均価格には 1KL 当たりに 2.9 万円程度であったのが、2008 年リーマン・ショック直前には 6 万円にも急騰した。現在は 5 万円程である。また、1.1 節の研究背景に述べたように 2020 年 1 月 1 日以降に使用する燃料油中の硫黄分濃度の規制値が従来の 3.5 質量%以下から 0.5 質量%以下に厳しくなり、石油製品の価格高騰や入手リスクが高まっている。そのため、燃料油の価格の上昇に伴い輸送コストも大幅に上回ることが予想され、国土交通省では規制に適合する燃料へ切り替えることで世界の海運全体における追加コストは約 3 兆 4000 億円になるとの試算がある。

3.3.2 コンテナ船の待機船について

コンテナ荷動き量は 2000 年に急速に伸びているが、近年に大量の新造発注によって、船腹量増加率が荷動き量増加率を継続的に上回り、需給が引き締まらない傾向がつづいてきた。船腹の供給量が必要量を超え、船腹の供給量と需要量のアンバランスが生じている。

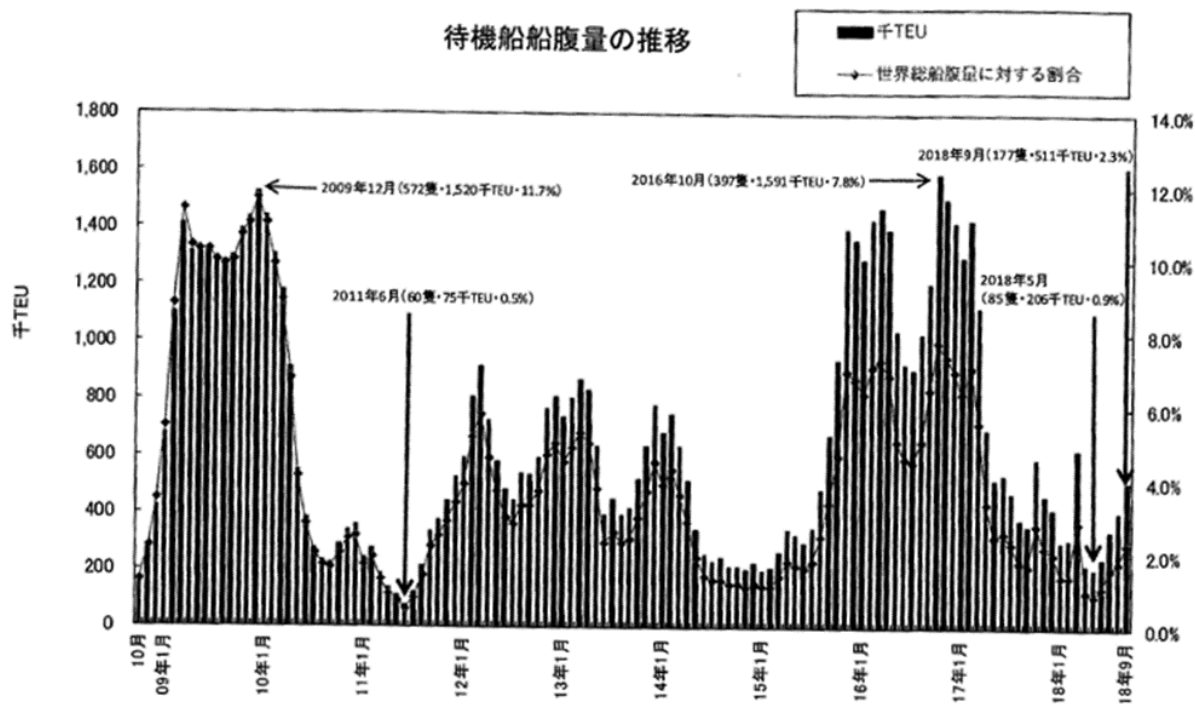


図 3.3.2 待機船船腹量の推移 ⁽¹⁶⁾

図 3.3.2 は 2018 年 9 月末までの待機船船腹量及びその世界総船腹量に対する割合を示したものである。待機船船腹量は 2008 年秋のリーマン・ショックの影響を受け 2009 年に 572 隻・1,520 千 TEU 以上となった。2011 年は荷動き量の急増を受けて大幅に減少し 60 隻・75 千 TEU になった。また、2016 年 10 月末時点では 397 隻・1,591 千 TEU となり最高記録だった。2018 年 6 月からは、相次ぐ新造船の竣工に加え東アジア-欧州航路の荷動きの影響などを受けた待機船船腹量は徐々に増加し、9 月末時点で 177 隻・511 千 TEU（全船腹量の 2.3%）となった。今後は、スラックシーズンに向けた減便対策などに加え例年以上に解撤が進んでいないこともあり待機船船腹量の増加は加速していくものとみられる。ALPHALINER の予測によれば、2018 年末の待機船船腹量は 750 千 TEU 程度まで増加するであろうとされている。

3.3.3 コンテナ・フリート

ここでは、国際海運におけるコンテナのフリートについて説明する。

1つ20FTのコンテナが1TEUに定義されているが、コンテナ船舶に積載したコンテナは20FTのコンテナだけでなく40FTや45FTなどのコンテナも存在している。図3.3.3に国際海運に使用されるコンテナのフリートを示す。



図 3. 3. 3a 主な海上コンテナの全長比較図 ⁽¹⁷⁾

年代	2013		2014		2015		2016		2017	
サイズ	TEU	TEU割合	TEU	TEU割合	TEU	TEU割合	TEU	TEU割合	TEU	TEU割合
20FT	10506359	31.76%	11089258	31%	11352961	31%	11360000	31%	11600000	30%
40FT	22018074	66.55%	23597240	67%	24326814	67%	24380000	67%	25880000	68%
45FT	511812	1.55%	508140	1%	530541	1%	550000	2%	520000	1%
その他	49439	0.15%	44832	0%	39640	0%	37000	0%	40000	0%
合計	33085684	100.0%	35239470	100.0%	36249956	100.0%	36327000	100.0%	38040000	100.0%

表 3. 3. 3 国際海運のコンテナ・フリートの推移 ⁽¹⁶⁾

このように、世界中で流通しているコンテナのサイズについては31%が20FTのコンテナ、67%が40FTコンテナ、約1%が45FT及びその他サイズのコンテナである。本研究では、第5章の荷役作業効率を考察するため計算上の都合により45FTとその他サイズのコンテナを除いて、全てのコンテナ構成率は20FTが32%、40FTが68%に見なして考察する。

3.4 減速航海について

①ここでは、研究対象とする減速航海について説明する。

2008 年のリーマン・ショックによる海運市場の低密や船用燃料価格の高騰があり、減速航海は各船会社に燃料コストを削減するための手法になった。また、新谷らの研究⁽¹⁷⁾では、減速航海による燃料消費量を削減するができ、国土交通省でも CO₂排出量の削減ため、減速航海を検討している。

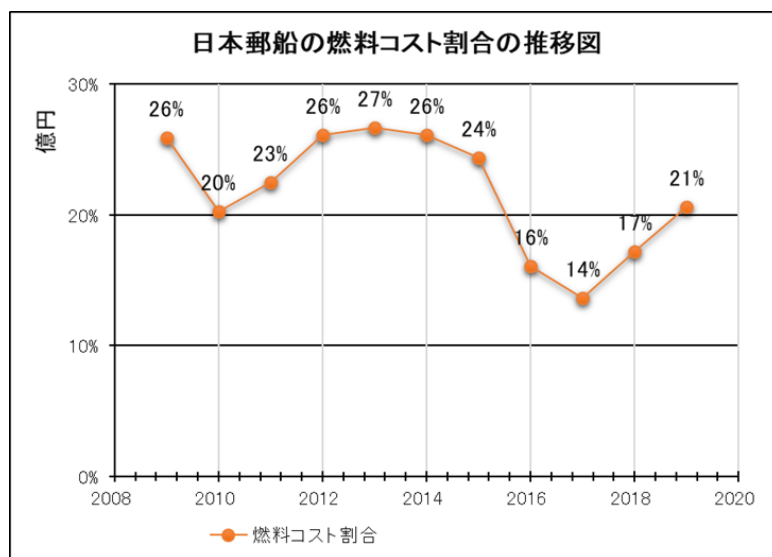


図 3.4.1 船会社の燃料コスト割合推移図

図 3.4 は船会社の海運業費用に占める燃料コストの割合である⁽³⁵⁾。海運業における燃料コストの割合が約 2 割程度になっている。燃料コストを削減するために、船会社が減速航海を導入していることが分かった。具体的には 4.6 節の減速航海の感度分析で説明する。

②SO_x排出規制による燃料コストの上昇

硫黄酸化物 (SO_x) による人の健康や環境への悪影響 (肺がん、酸性雨など) が世界的な問題である。大気環境の改善のため、IMO では 2020 年から船舶用燃料油の硫黄分濃度 0.5% 以下に規制を強化した。

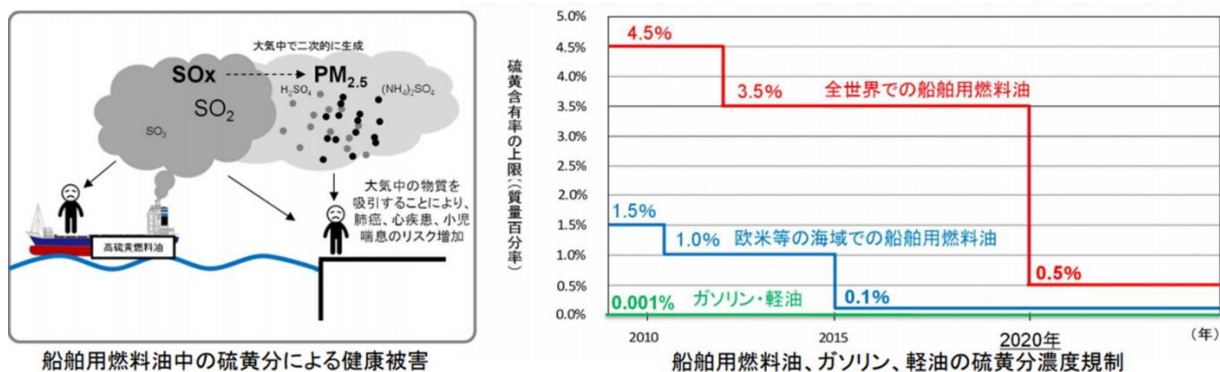


図 3.4.2 SO_x 規制の概要⁽³⁶⁾

SO_x規制への対応として、1.「規制適合油（低硫黄燃料油）への切り替え」、2.「排気ガス洗浄装置（スクラバー）の設置」、3.「LNG（天然ガス燃料）等の代替燃料の使用」が挙げられている。それぞれのメリット及び課題を図 3.4.3 に示す。

	規制適合油への切り替え	SO _x スクラバーの搭載	LNG 燃料船への切り替え
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ・設備投資は不要 ・既存のバンカリングインフラを活用可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・既存燃料油と規制適合油の価格差次第では、早期に投資回収が可能 ・既存のバンカリングインフラを活用可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・SO_x の他にも NO_x、CO₂ も同時に削減可能（なお、NO_x TierⅢ 対応に向けては、エンジンタイプにより追加投資が必要）
課題	<ul style="list-style-type: none"> ・価格、品質などニーズに沿った燃料油の安定調達が懸念 ・燃料費の増加が懸念 ・SO_x 規制への対応に留まる 	<ul style="list-style-type: none"> ・設備投資が必要 ・大型装置ゆえに、船舶によっては設置制約が懸念 ・既存燃料油の安定調達が懸念 ・SO_x 規制への対応に留まる 	<ul style="list-style-type: none"> ・設備投資が必要 ・バンカリングインフラの整備が必要

図 3.4.3 SO_x 規制の対応手段⁽³⁷⁾

Camille Egloff らの予測⁽³⁸⁾によると規制の開始時点では、ほとんどの船舶が低硫黄燃料油に切り替えることに見られている。そうすると IMO では世界的に年間 300 億ドルから最大で 600 億ドルのコスト増加を試算している。燃料油の価格差を表 3.4.4 に示す。

		硫黄分質量%
HSFO	高硫黄重油	3.5%
LSFO	低硫黄重油	0.5%
MGO	マリンガスオイル	0.1%

	2020年	価格差[\$/t]
Ce Delft	LSFO-MGO	21
IEA	HSFO-MGO	350
JBC Energy	HSFO-LSFO	289
Drewry	HSFO-LSFO	303

表 3.4.4 主要調査機関の船舶燃料油価格見通し⁽³⁷⁾

③海運会社の対応

Drewry 海事調査会社⁽³⁹⁾によると、SOx 規制による燃料価格上昇に対応するため、コンテナ船社は速力低下に伴う航海日数の増加を防ぎ、トランシップを増加する形で減速航海を積極的に取り組んでいる。海運会社の環境活動実績を表 3.4.5 に示す。米国のロサンゼルス港では、沿岸 20NM 以内を 12KT 以下で減速航海するよう船社に要請している。ロングビーチ港は、1 年間の減速航海実績に従い、翌年に岸壁使用料を減額するインセンティブ・スキーム（20NM 以内の減速航海は港湾料金の 15%、40NM 以内は 25% 引き）を導入している。

2018年環境活動実績と2019年環境目標		
環境ビジョン2050	温暖化防止：CO2排出量の半減	
環境目的	温室効果ガスの抑制	エネルギー資源の消費節減
2019年中期目標	CO2排出量の削減（2030年に2011年比で輸送トンマイルベース25%減）	継続的な船舶の燃料・潤滑油使用量の削減
2018年環境目標	CO2排出量を輸送トンマイルベースで削減する	Eco Slow Steaming（減速航海）の促進を行う
2018年評価	○	○
2018年達成状況	CO2排出量2.3%減少しました。米国ロングビーチ港に寄港する際135回、ロサンゼルス港に寄港する際11回、両港合計146回の減速航行を実施しました。	毎月本船の減速状況を把握し、省エネ運航連絡会（年4回）にて各運航部門に減速及び燃費消費量の現状を周知した。また、営業部門と船主との減速深度化の協議では技術的サポートを行った。
2019年度環境目標	・減速航行の励行・EEDIによるCO2排出量削減を目指す・自主的に港湾、沿岸域で減速航行をする	・毎月、各部門の減速運航状況および環境・省エネ機器の搭載状況を把握、監視する。（1回/月） ・燃料消費量を把握し、省エネ運航連絡会において各運航部門に燃料消費量の現状の周知を行う。（4回/年）

表 3.4.5 海運会社の環境活動実績⁽⁴⁰⁾

④IMO の GHG 削減戦略及び各国の提案

2018 年 4 月に IMO は今世紀中なるべく早期に、国際海運からの GHG ゼロ排出を目指すという GHG 削減戦略を採択した。具体的に図 3.4.6 に示す。

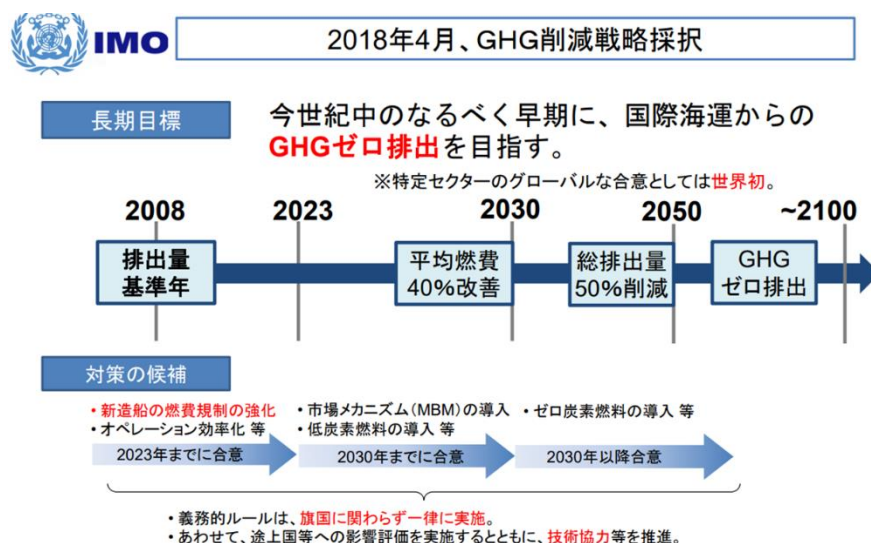


図 3.4.6 GHG 削減戦略⁽¹¹⁾

IMO が GHG 削減目標を達成する当面の対策として、「新造船に EEDI 規制強化」と「既存船に短期的対策を 2023 年までに策定」を採択した。そのうち、新造大型化コンテナ船に対する EEDI の規制は 2022 年に前倒して、40%の削減へ強化した。既存船に対する短期的対策は、「運航時の平均燃費実績による規制」や「運航時の平均速度による規制」などが候補として提案された。2030 年の国際海運における船舶の平均燃費を 40%改善という目標を達成するため、各国からの主な提案を国土交通省の資料により、図 3.4.7 に示す。

提案国	規制対象	概要
日 本	設計燃費	①燃費性能の算定(EEDIベース)と、②エンジン出力制限等による燃費改善を義務付け、証書で認証。
ノルウェー	設計燃費	日本提案とほぼ同じ内容。
デンマーク・ドイツ・スペイン	年間平均燃費(実績)	毎年、年間平均燃費実績を提出させ、規制値を満たすことを義務付け。(不適合時は証書無効化)
フランス	年間平均速度(実績) or 年間平均燃費(実績)	毎年、i) 年間平均速度又はii)年間平均燃費実績を提出させ、規制値を満たすことを義務付け。(不適合時の扱いは不明)
イギリス	NA	ライフサイクル燃料炭素密度を算定の上、経済的手法(MBM)や低・脱炭素燃料への補助金を導入。
クリーン海運同盟(CSC)	年間平均速度(実績)	毎年、年間平均速度実績を提出させ、規制値を満たすことを義務付け。(罰則は不明)
国際海運会議所(ICS)	各船/各社が決定	各船/各社に効率改善目標(効率の定義は各船/各社が決定)を記載させ、毎年、主管庁が確認。
世界海運評議会(WSC)	年間燃料消費量(実績)	毎年の燃料消費実績に応じ、研究開発基金への拠出を義務付け、研究開発支援ファンドを創設。(コンセプトを提示)

図 3.4.7 2030 年目標達成に向けて：各国からの主な提案 ⁽⁴¹⁾

年間の平均速度と燃費が規制対象とした提案が多くため、減速航海はますます重要になっていくと考えられる。

4. 計算モデルの定式化および感度分析

4.1 計算モデルの概要

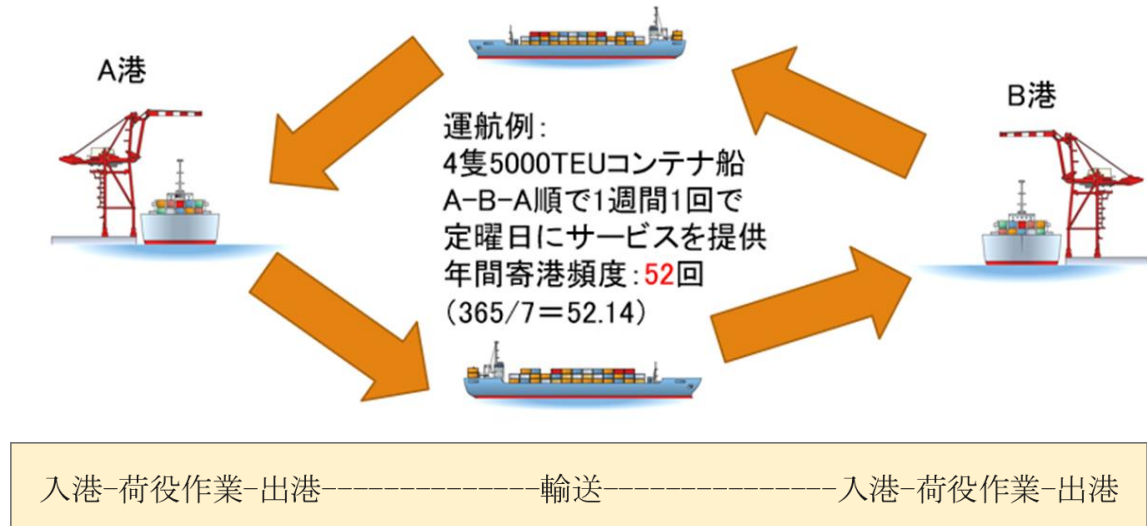


図 4.1.1 モデル概要図

本研究の計算モデルは図 4.1.1 に示したように、航路でサービスを提供する際の船舶状況である。また、定曜日のサービスのため、年間寄港頻度が 52 回に見なす。

4.2 必要隻数の定式化

4.2.1 1 サイクル時間の構成

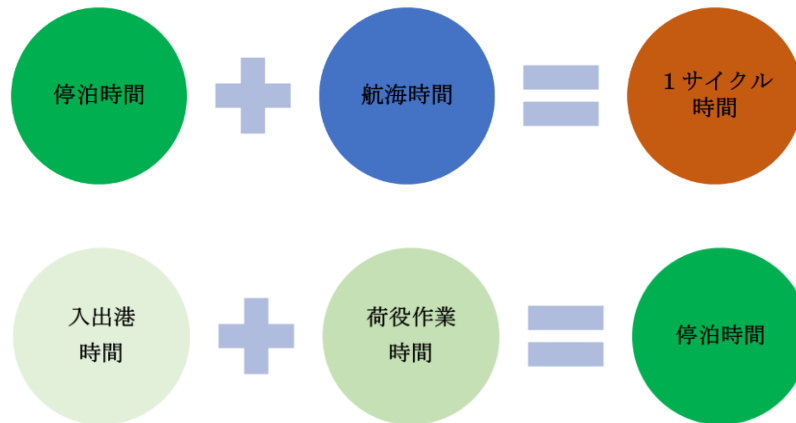


図 4.2.1 1 サイクル時間の構成図

定期航路で運航しているコンテナ船が航路サービスを1周するのに要する時間を1サイクル時間と定義する。図4.2.1に示したように、1サイクル時間は停泊時間と航海時間に構成される。また、停泊時間は入出港時間と荷役時間に構成される。荷役時間が船型に、入出港時間が寄港回数に比例すると考えると、下記の式のように表せる。

$$T_0 = T_1 + T_2 \text{ ----- (1)}$$

$$T_2 = T_3 + T_4 \text{ ----- (2)}$$

$$T_1 = s/v \text{ ----- (3)}$$

$$T_3 = c_D \times D \text{ ----- (4)}$$

$$T_4 = C_p \times PN \text{ ----- (5)}$$

$$T_2 = c_D \times D + C_p \times PN \text{ ----- (6)}$$

T_0 : 1 サイクル時間[h]

T_1 : 航海時間[h]

T_2 : 停泊時間[h]

T_3 : 荷役時間[h]

T_4 : 入出港時間[h]

S : 航海距離[nm]

V : 航海速度[kt]

C_D : 荷役時間の係数[h/TEU]

C_p : 入出港時間の係数[h/回]

PN : 寄港回数[回]

D : 船型[TEU]

この内、航海時間は式(3)に示すように、航海距離と航海速度から求められる。1サイクル時間から航海時間を引いた値は停泊時間とする。なお、輸送サービス毎の航海距離は、国際輸送ハンドブック⁽²⁶⁾に記載されている寄港地から航海距離を求め、船速は記載されている就航船舶の船速を用いた。航海距離や航海速度などのデータについては、4.5節の用いるデータに示す。

したがって式(6)に表すように目的変数を停泊時間とし、説明変数を寄港回数、船型として回帰分析を行い、入出港時間の係数 C_p 、荷役時間の係数 C_d を求めた。また、回帰係数を推定する際、回帰定数は0として分析を行った。

航路	重相関 R	重決定 R ²	補正 R ²	標準誤差	観測数	有意 F
東アジア-北米航路	0.9333	0.9373	0.8465	250.0199	48	6.24597E-21
東アジア-欧州航路	0.9866	0.9734	0.9403	122.8997	33	1.4371E-24
欧州-北米航路	0.9756	0.9519	0.8864	134.6038	18	8.27E-11

表 4.2.1a 決定係数表

	東アジア-北米航路		東アジア-欧州航路		欧州-北米航路	
因子	寄港回数	平均船型	寄港回数	平均船型	寄港回数	平均船型
係数	40.689	0.034	47.296	0.009	39.895	0.038
t	4.633	3.385	13.932	2.639	3.817	2.197

表 4.2.1b 回帰分析結果表

4.5節に示すデータから回帰分析の結果を表 4.2.1b で表す。3つの航路の決定係数 R^2 が0.9以上になり、モデルの精度は高い。また、係数の t 値も高く、有意水準 1%で有意である。

4.2.2 必要隻数の算出式

定期航路における定曜日のウィークリーサービスを行い、コンテナ船が1週間に1回を寄港する。そのため、航路を構成する必要隻数は式(7)で表せる。

$$N = \text{ROUNDUP} \{ [T_0 / (24 \times 7)] , 0 \} \text{ ----- (7)}$$

N : 必要隻数[隻]

T_0 : 1 サイクル時間[h]

4.3 CO₂排出量の定式化

CO₂排出量は燃料消費量と排出係数から求められる。燃料消費量は就航するコンテナ船の船型や航海速度によって異なる。そこで、これらの影響を考慮した二酸化炭素排出量の推計を行うために参考文献で用いられている算出式から CO₂排出量を算出する。

4.3.1 燃料消費量の算出式

ここでは、国土総合技術研究所の先行研究⁽¹⁸⁾を参考にして本研究モデルにおける燃料消費量の算出式に示す。

$$FL = F_0 \times (S \times 1.852) \times f \quad \text{----- (8)}$$

$$F_0 = 6.87 \times 10^{(-5)} \times \{DSP - (1 - 0.65 \times LF) \times DWT\} \times DSP^{(-1/3)} \times (V \times 1.852)^2 \quad \text{----- (9)}$$

$$DSP = 1.37 \times DWT + 1660 \quad \text{----- (10)}$$

$$DWT = D \times 10.8 + 12400 \quad \text{----- (11)}$$

FL : 年間燃料消費量[kg/年]

f : 寄港頻度[回/年]

F₀ : 燃料単位距離消費量[kg/km]

DSP : 船舶の満載排水トン[トン]

LF : 消席率[%]

DWT : 船舶の載貨重量[トン]

4.3.2 CO₂排出量の算出式

ここでは、日本環境省の資料⁽¹⁹⁾を参考にして、本研究モデルにおけるCO₂排出量の算出式に示す。

$$CO_2 = \alpha \times FL \quad \text{-----} \quad (12)$$

CO₂ : 年間CO₂排出量(トン/年)

α : 船舶燃料におけるCO₂排出係数[トン/kg]

4.4 輸送コストの定式化

ここでは、コンテナ船が定曜日のウィークリーサービスを提供する際に、発生した輸送コストの構成および算出式を示す。

4.4.1 輸送コストの構成

まず、本研究用モデルの輸送コストは黒川ら⁽²⁰⁾に基づいて構成される。下記の表 4. 4. 1 に示したように、輸送コストは運航コストや船費およびコンテナ関係費の和で表す。

輸送コスト	
運航コスト	燃料コスト
	入出港料金
	荷役作業料金
直接船費	船員費用
	修繕費
	船用品費
間接船費	減価償却費
	利息
	保険料
コンテナ関係費	修繕費
	利息
	コンテナ償却費

表 4. 4. 1 輸送コスト構成表

4.4.2 輸送コストの算出式

ここで輸送コストを構成される運航コスト、船費、コンテナ関係費について説明する。

運航コスト：貨物の海上輸送のため、直接必要な船舶の運航にかかるコストであり、燃料コストと入出港料金および荷役作業料金で構成される。なお、運航コストにおける係数の設定は4.5節に示す。

$$OC = FC + HC + PC \text{-----} \quad (13)$$

$$FC = FL \times CF_{\text{単}} \text{-----} \quad (14)$$

$$HC = HC_{\text{単}} \times Q \times 2 \text{-----} \quad (15)$$

$$PC = (PC_{\text{切}} + PC_{\text{係}} \times D) \times f \times PN \text{-----} \quad (16)$$

$$Q = D \times f \times 2 \text{-----} \quad (17)$$

OC：年間運航コスト[USD/年]

FC：年間燃料コスト[USD/年]

HC：年間荷役作業料金[USD/年]

$CF_{\text{単}}$ ：船用燃料単価[USD/kg]

$HC_{\text{単}}$ ：荷役作業料金単価[USD]

PC：年間入出港料金[USD/年]

$PC_{\text{切}}$ ：入出港係数の切片

$PC_{\text{係}}$ ：入出港料金係数の傾き

Q：年間輸送量[TEU/年]

船費：船隊を管理するために必要な費用であり、直接船費と間接船費を構成され、固定費的なものである。しかし、航路サービスの必要隻数による変化する。なお、船費における係数の設定は4.5節に示す。

$$SC = \{SP \times (RC + RP + C_{\text{利}} + IF + BS) + LC\} \times N \text{-----} \quad (18)$$

$$SP = SP_{\text{切}} + SP_{\text{係}} \times D \text{-----} \quad (19)$$

SC：船隊の年間船費[USD/年]

RC：修繕費係数

RP：減価償却費係数

$C_{\text{利}}$ ：利息係数

IF：保険料係数

BS：船用品費係数

LC：船員費[USD/年]

SP：コンテナ船の船型における価格

コンテナ関係費：海運会社が所有するコンテナを管理するために必要な費用であり、コンテナ償却費と修繕費および利息を構成される。なお、コンテナ関係費における係数の設定は 4.5 節に示す。

$$CRE = CRE_{\text{単}} \times (C_{RC} + C_{RP} + C_{C利}) \times CQ \text{-----} (20)$$

CRE：コンテナ関係費[USD/年]

CQ：航路サービスにおけるコンテナ本数[本/年]

CRE_単：コンテナ 1 TEU 当たり単価[USD/本]

C_{RC}：コンテナにおける修繕費係数

C_{RP}：コンテナにおける減価償却費係数

C_{C利}：コンテナにおける利息係数

輸送コストは運航コストや船費およびコンテナ関係費の和で表す。また、これを年間輸送量で割算し、1 TEU 当たり輸送コストを算出する。

$$TC = FC + HC + PC + SC + CRE \text{-----} (21)$$

$$TC' = TC \div Q \text{-----} (22)$$

TC'：1 TEU 輸送コスト[USD/TEU]

TC:年間輸送コスト[USD/年]

4.5 用いるデータおよびモデルの係数設定

4.5.1 航路サービスのデータ

ここでは、国際輸送ハンドブックのデータの抽出方法を示す。まず、表 4.5.1a に示したようにデータを集計する。次に、集計したデータを表 4.5.1b のように修正する。なお、寄港地間の距離は SEA-DISTANCES/PORT-DISTANCES による測定する。

North America																			
オペレータ名	CMA CGM/COSCO/Evergreen																		
サービス名	01. HBB / AAC2 / CPS																		
ローテーション	Rotation: Qingdao(Wed/Fri)[0] — Shanghai(Sat/Mon)[1] — Ningbo(Mon/Wed)[3] — Los Angeles(Mon/Thu)[17] — Oakland(Fri/Sun)[21] — Tokyo(Sun) — Qingdao(Wed/Fri)																		
航海頻度	Weekly (Using 6 vessels with a round-trip of 42 days) 1 サイクル時間 1008 航海距離 12479 寄港頻度 6																		
投入船				航海速度	船型														
Vessel	Flag	Call Sign	Built	Speed	TEUs	R-plugs	Gross	DW	C'fication	Accom.	Operator								
EVER LOGIC	Tw	BKIF	2013	24.5	8452	948	98882	104366	CR	R	Evergreen								
EVER LIBRA	Tw	BKIC	2012	24.5	8452	948	98882	104472	LR	R	Evergreen								
NAVARINO	HK	VRQD6	2010	25.8	8531	700	91354	102302	GL	R	Evergreen								
EVER LUCENT	Sg	9V9792	2014	24.5	8508	948	99946	104397	AB	R	Evergreen								
EVER LOADING	Br	2HDG4	2014	24.5	8508	948	99946	104300	LR	R	Evergreen								
EVER LOVELY	Sg	9V9793	2015	24.5	8508	948	99946	104357	AB	R	Evergreen								
隻数	6		平均値	24.71667	8493.167														

表 4.5.1a 航路サービスの元データ例

サービス名	航海距離	1 サイクル時間	平均速度	平均船型	寄港頻度	隻数	航海時間	停泊時間
01. HBB / AAC2 / CPS	12479.0	1008.0	24.7	8493.2	6.0	6.0	504.9	503.1

表 4.5.1b データの修正例

このような修正したデータベースを用いて重回帰分析を行い、結果は 4.2 節に示めす。また、平均船型を変化させる場合は航海速度の値は平均船型に応じた航海速度を算出し、図 4.5.1 に示す。

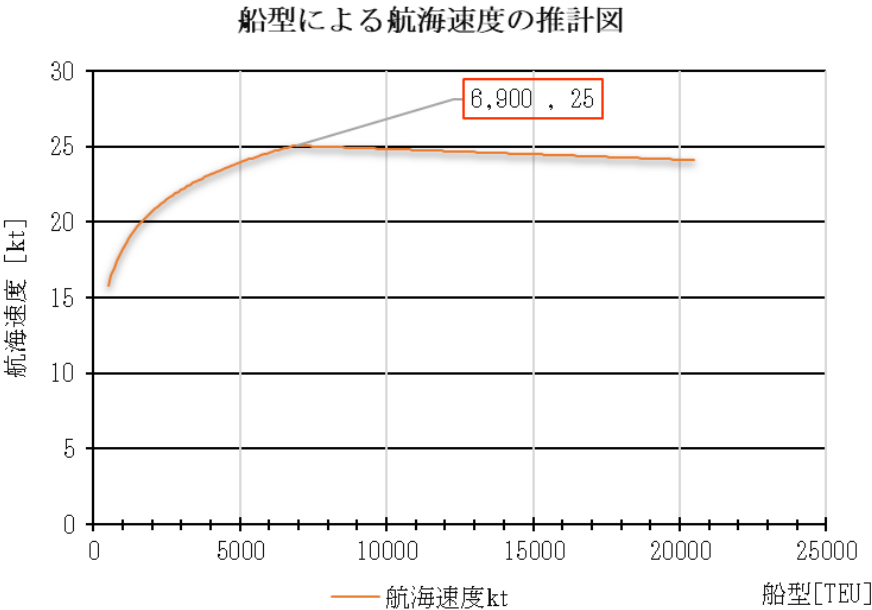


図 4.5.1 平均船型と航海速度の関係

研究対象とした航路に就航しているコンテナ船の輸送サービスの平均船型は約 1000～20000TEU である。航海速度は 1000TEU では約 16KT で 6900TEU 辺りまで 25KT に増加し、それ以降は横ばい傾向を示している。

4.5.2 モデル係数の設定

ここでは、モデル航路を構築するための係数について説明する。

まず、航海距離と平均船型および寄港回数により 1 サイクル時間を算出する。荷役時間係数と入出港時間係数は表 4. 2. 1b 回帰分析結果表に示す。次に、運航コストに関する係数を説明する。船用燃料単価 CF_単は参考文献⁽⁶⁾によるシンガポール港のコンテナ船用燃料価格を用いた。荷役作業料金単価 HC_単は参考文献⁽²⁰⁾の比率を参考にし、各港湾のホームページで更新した平均費用を用いて、図 4. 5. 2 に示す。

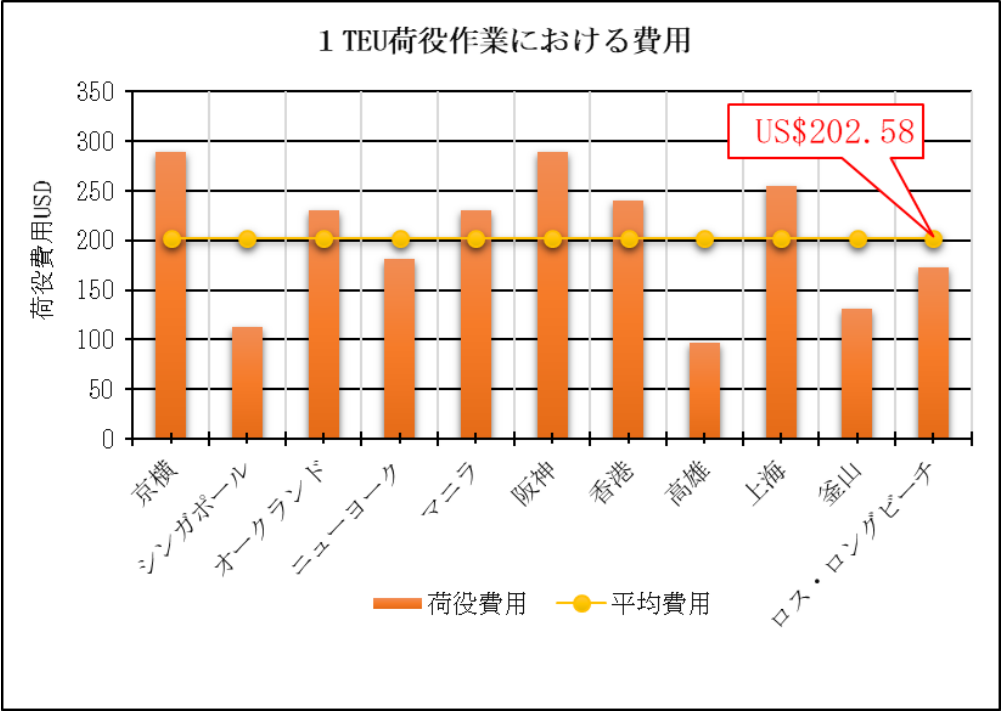


図 4. 5. 2 1 TEU 当たり荷役作業料金

入出港料金については、各港湾のホームページ⁽²¹⁾での情報を用いて船型別に入出港料金を推計した。表 4. 5. 2 に回帰分析の結果を示す。

入出港料金		
因子	切片	船型
係数	7478.3	29.6
t	2.7988	129.51
P-値	0.0115	2E-29
有意 F	2E-29	
重決定 R2	0.9989	

表 4. 5. 2 入出港料金の回帰分析

船舶価格		
因子	SP切	SP係
係数	20869711.42	3800.768
t	2.894801091	5.321783
有意F	3.34668E-08	

表 4.5.3 コンテナ船価格の回帰分析

このように、船型ごとで各港におけるコストを推計し、係数を設定した。また、決定係数 R^2 と t 値が高く、有意水準 5% で有意である。

続いて船費に関係する係数を説明する。本研究では船舶価格を用いて算出することとする。減価償却費を建造船価に基づいて求める。船舶価格については、コンテナ船の売買を記録する参考文献⁽³⁴⁾を用い建造船価を船型との関係から推計した（式 19）。SP 切、SP 係の設定は表 4.5.3 に示す。また、減価償却費や修繕費などについては参考文献⁽²²⁾の係数を用いて、算出した。最後にコンテナ関係費について説明する。新造コンテナ価格は Containerization International の情報を調査した。コンテナの減価償却費などについては、参考文献⁽²³⁾の係数を用いて算出した。

4.6 モデルを用いた感度分析

4.6.1 大型化による感度分析

ここでは、モデルを用いて大型化の感度分析について説明する。

まず、東アジア-北米航路の航海距離を用いて各航路の大型化による1サイクル時間の変化傾向を説明する。なお、主要航路の条件については5.1節に示す。

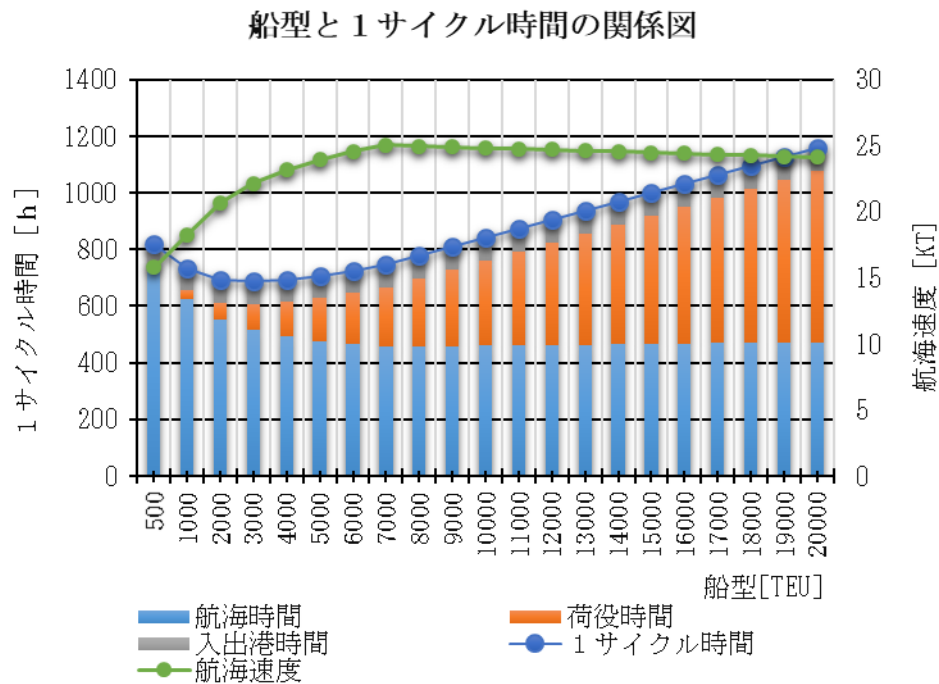


図 4.6.1a 東アジア-北米航路の1サイクル時間変化

図 4.6.1a に示したように、500TEU-3000TEU の1サイクル時間は航海速度の増加のため減少傾向になるが、3000TEU から大型化すると船型の増加に伴う1サイクル時間も増加する。船型を増加することでサービス航路の輸送能力が向上し、荷役時間と1サイクル時間共に長くなる。

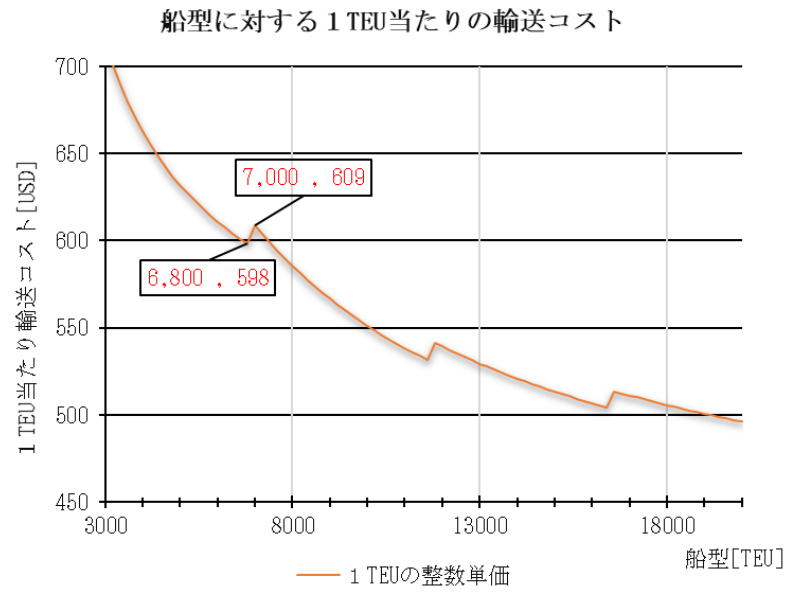


図 4.6.1b 船型と輸送コストの関係

また、図 4.6.1b をみると 1 TEU 当たりの輸送コストは船舶の大型化につれて減少傾向になるが、6,800TEU から 7,000TEU まで増加すると輸送コストも増えた。

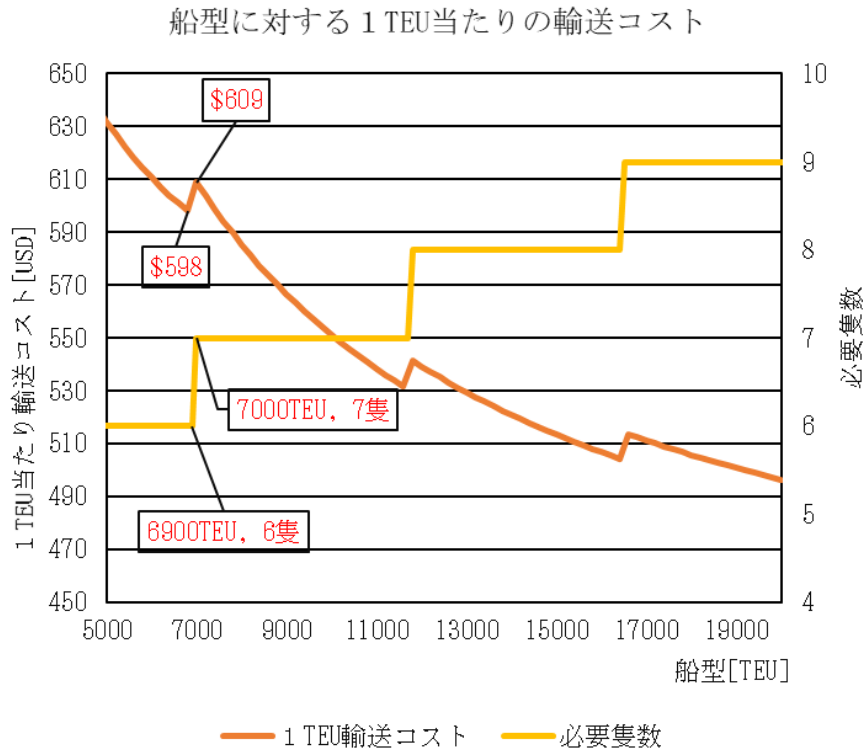


図 4.6.1c 船型と 1 TEU 当たり輸送コストの関係

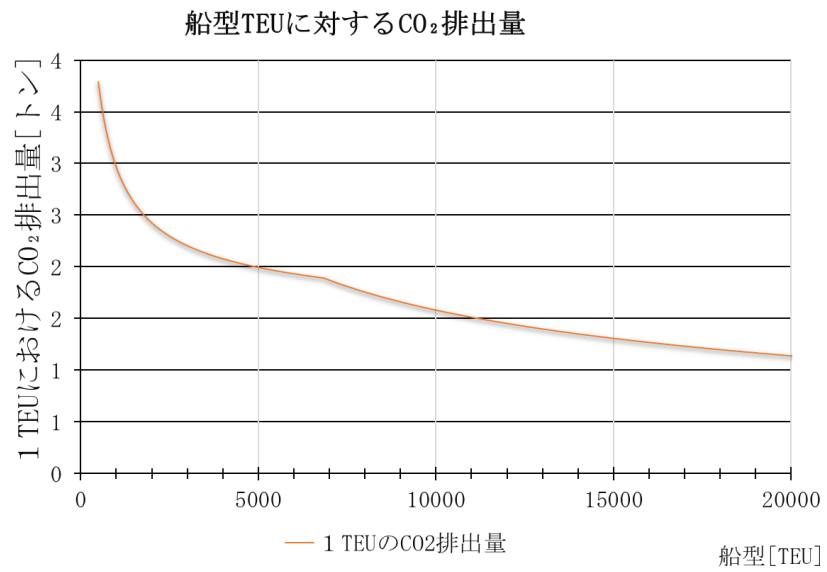


図 4.6.1d 船型と 1 TEU 当たり CO₂ 排出量の関係

図 4.6.1c に示しているように、船型による 1 サイクル時間を変化すると週 1 回の寄港頻度を維持するため、必要隻数も増加する。必要隻数が増加する際に 1 TEU における輸送コストも増加する。また、図 4.6.1d に船型が大型化すると大量の貨物を 1 回にまとめて輸送することで、1 TEU 当たり CO₂ 排出量の削減ができる。

4.6.2 減速航海による感度分析

ここでは、モデルを用いて減速航海の感度分析の結果を示す。

まず、航海距離を一定し航海速度を変化することで、年間 CO₂ 排出量の変化が、図 4.6.2 に示しているように、減速航海を行うことで全ての船型における CO₂ の排出量が減少していることが分かる。環境規制に対して、減速航海が有効である。しかし、減速航海による 1 サイクル時間が長くなり、必要隻数が増加することが分かった。

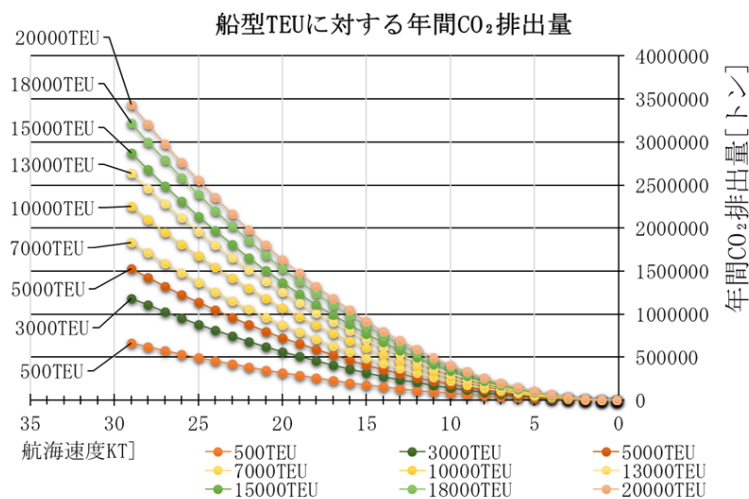


図 4.6.2a 船型別の減速航海による CO₂排出量

船型 TEU と年間 CO₂ 排出量の関係については、図 4.6.2b に分かるように船型は異なる場合でも、必要隻数を 1 つ増加することで、かなりの減速航海ができる。

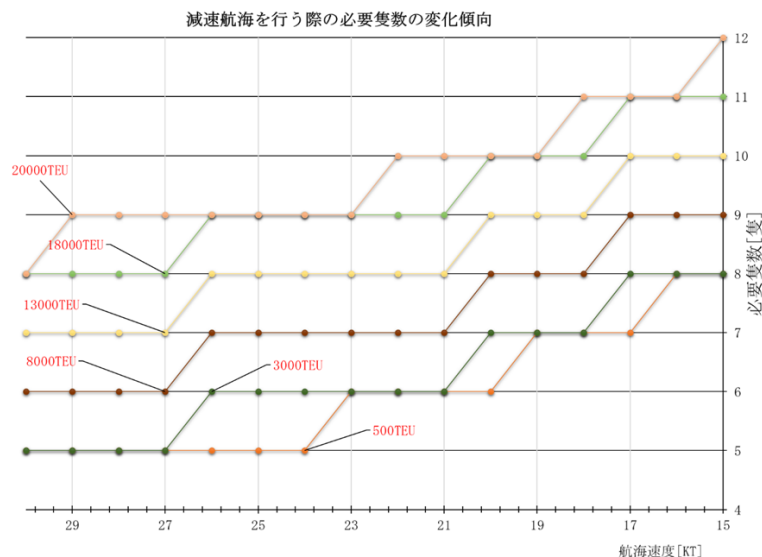


図 4.6.2b 減速航海による必要隻数の増加

最後に、減速航海の 1 TEU 当たり輸送コストについて検討する。図 4.6.2c に示しているように、航路サービスにおいて、運航する船舶はある程度の航海速度までに減速をすれば、

1TEU 当たりの輸送コストが減少傾向になる。それ以上の減速航海をすると 1TEU 当たりの輸送コストが増加傾向に変わる。

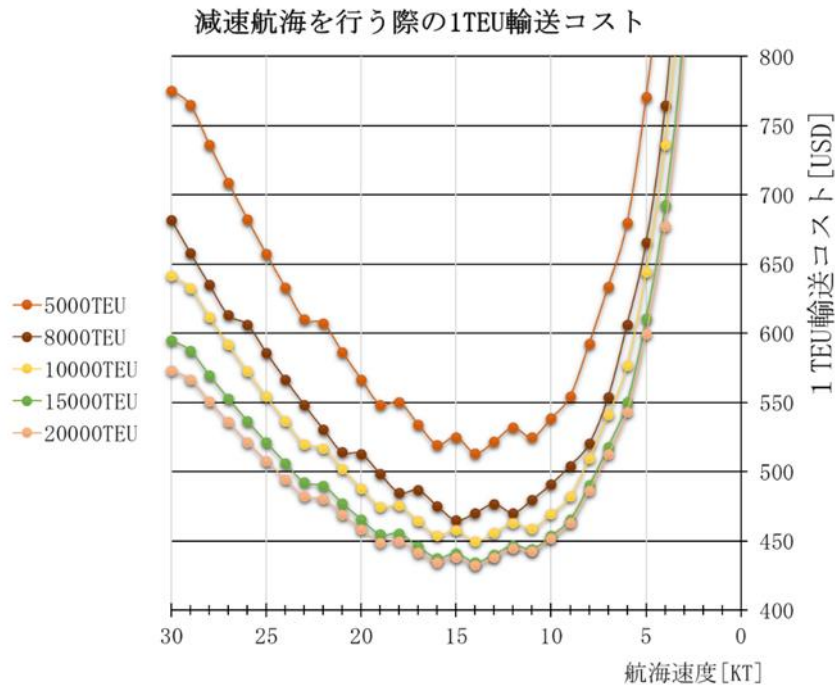


図 4.6.2c 減速航海による輸送コストの変化

また、図 4.6.2d のように航海速度が燃料コストに影響を与え、必要隻数が船舶コスト及びコンテナ本数に影響している。船型、航海距離、寄港頻度が一定するため、港湾における費用に影響がない。そのため、港湾におけるコストが一定することである速度までに 1TEU 当たり輸送コストは燃料コストの減少に伴い減少する。ある程度の減速航海を行う際に、必要隻数が増加したコスト上げの部分は燃料コストの下げ部分でカバーすることが分かった。つまり、航海距離及び船型 TEU による輸送コスト最小にする航海速度が存在している。

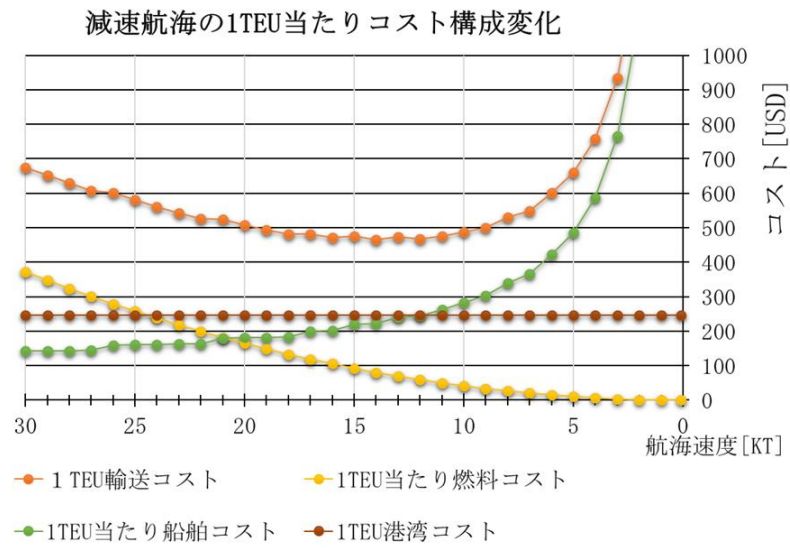


図 4.6.2d 減速航海による輸送コストの変化（船型一定）

では、感度分析の結果をまとめると、必要隻数を増やさず、ある程度の減速航海を行うことで燃料消費量が減少し、CO₂排出量及び輸送コストの削減ができる。また、サービスの航路特徴（平均船型、寄港回数、航海距離）が減速航海に制約していることが分かった。そのため、第5章は各主要航路における減速航海への考察を行う。

5. 主要航路における減速航海への考察

5.1 各航路の特徴について

まずは、東西基幹航路の主要航路の配船状況を表 5.1.1 と図 5.1.1 に示す。

航路	船型TEU		1000未満		1000-2999		3000-4999		5000-7999		8000-13999		14000-17999		18000以上		平均船型	平均船型の増減
	隻数	増減	隻数	増減	隻数	増減	隻数	増減	隻数	増減	隻数	増減	隻数	増減	隻数	増減		
東アジア-欧州航路	340	4	0	0	1	1	15	6	25	2	105	-40	107	9	87	27	13,485	375
東アジア-北米航路	441	11	4	2	12	-2	32	-24	129	8	253	21	11	5	0	0	8,297	559
欧州-北米航路	217	13	2	1	43	7	85	8	51	-16	36	12	0	0	0	0	5,061	-141

表 5.1.1 2018 年 8 月末の主要航路の船型別隻数（増減：2017 年 8 月の比較）⁽²⁴⁾

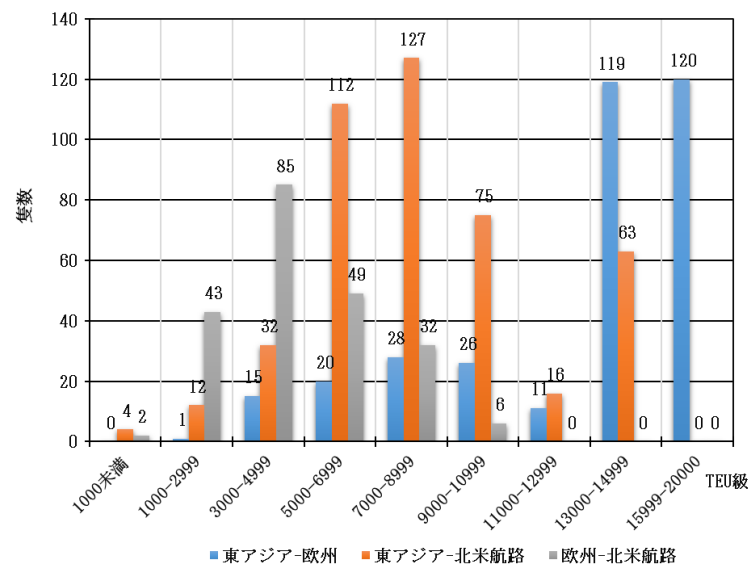


図 5.1.1 2018 年 8 月時点の船型別隻数⁽¹⁹⁾

① 東アジア-欧州航路

東アジア-欧州航路については、隻数が 4 隻増加し 340 隻となった。船型別隻数は主に 8,000～13,999TEU が 40 隻数減少、18,000TEU 以上は 27 隻増加した。20,000TEU を超える大型新造船の竣工に伴い船型の大型化が進んだ。平均船型は 375TEU 大きくなった 13,485TEU となり、最大船型の航路である。

② 東アジア-北米航路

東アジア-北米航路については、隻数が 11 隻増加し 441 隻となった。船型別隻数は、8,000～13,999TEU が 21 隻数増加、3,000～4,999TEU が 24 隻減少した。パナマ運河拡張に伴ったクラシックパナマックスからネオパナマックスへのリプレースの動きが一段と進展しているものとみられる。平均船型は 559TEU 大きくなった、8,297TEU となり、初めて 8,000TEU を超えた。

③ 欧州-北米航路

欧州-北米航路については、隻数が 13 隻増加し 217 隻となった。船型別隻数は 8,000～13,999TEU が 12 隻増加した。5,000TEU 未満の船舶が 15 隻増加した一方、主要船型クラスの

5,000～7,999TEU は 16 隻減少した。そのため、平均船型は 141TEU 小さく 5,061TEU になった。

次は、航路の特徴を表 5.1.2 と図 5.1.2 に示す。東アジア-欧州航路は、サービス数は少ないが最も大型化が進んでいる航路である。航路の平均距離も長いので 1 サービス当たりの平均隻数も多い。東アジア-北米航路は、多くのサービスが運航されるが 1 サービス当たりの寄港回数が少ない。欧州-北米航路について、サービス数は東アジア-欧州航路よりやや多いが平均距離と平均船型は最も小さい航路である。

	[個]	[TEU]	[隻]	[回]	[NM]
航路	サービス個数	平均船型	平均隻数	寄港回数	平均距離
東アジア-北米航路	57	8297.0	8.1	6.4	17345.8
東アジア-欧州	33	13484.6	10.8	11.9	21634.0
欧州-北米航路	37	5061.3	6.1	6.7	10384.5

表 5.1.2 各航路の特徴 (2018 年)

主要定期航路の比較 (2018)

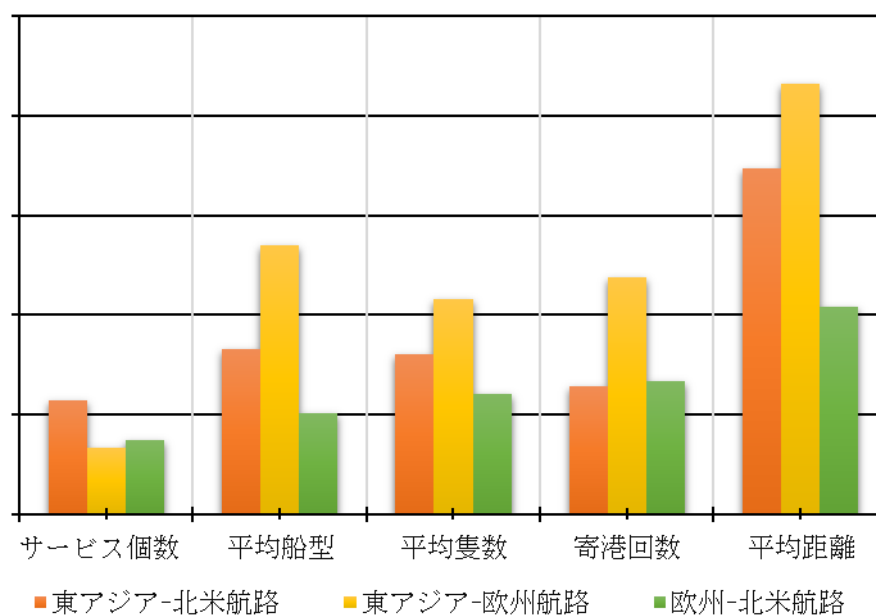


図 5.1.2 各航路の特徴比較

最後に、各航路の平均値を用いてモデルで1サイクル時間の構成を示す。

① 東アジア-北米航路

東アジア-北米航路の1サイクル時間構成図

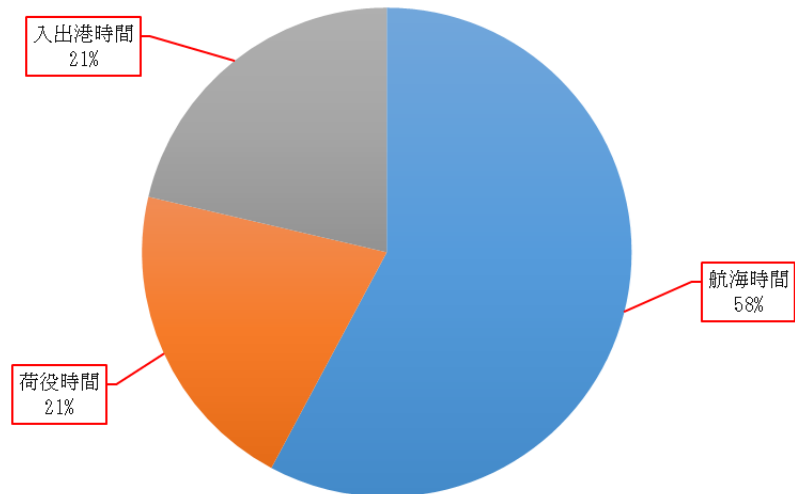


図 5.1.3 東アジア-北米航路の1サイクル時間構成

東アジア-北米航路の1サイクル時間の構成については、航海時間が58%、荷役時間が21%、入出港時間が21%を占めている。

② 東アジア-欧州航路

東アジア-欧州航路の1サイクル時間構成図

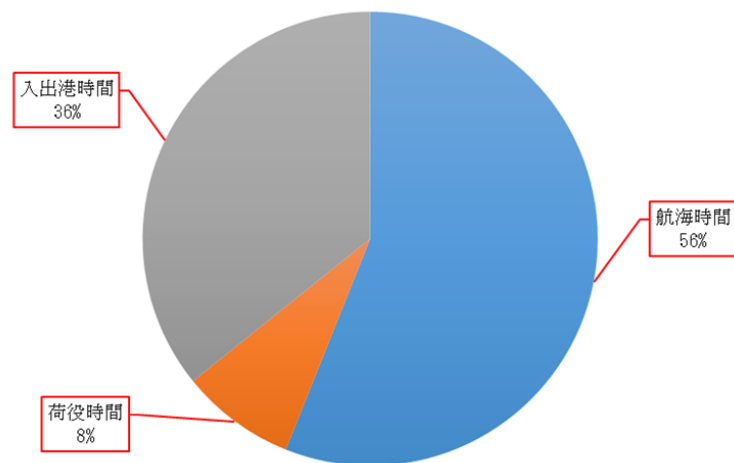


図 5.1.3 東アジア-欧州航路の1サイクル時間構成

東アジア-欧州航路の1サイクル時間の構成については、航海時間が56%、荷役時間が8%、入出港時間が36%を占めている。

③ 欧州-北米航路

欧州-北米航路の1サイクル時間構成図

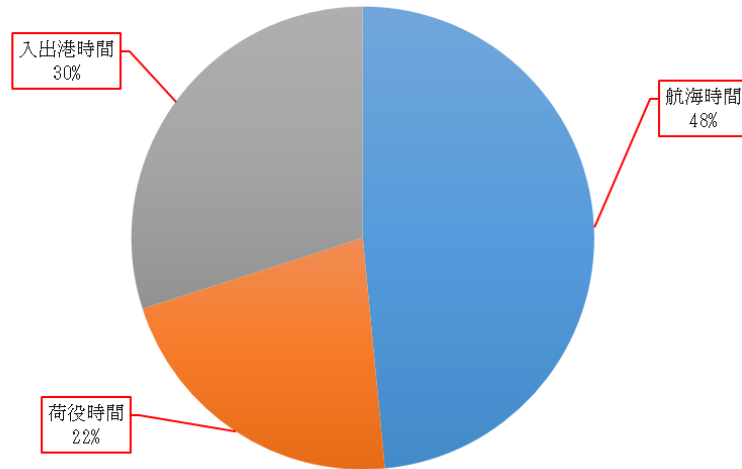


図 5.1.3 欧州-北米航路の1サイクル時間構成

東アジア-欧州航路の1サイクル時間の構成については、航海時間が48%、荷役時間が22%、入出港時間が30%を占めている。

どの航路においても、1サイクル時間に停泊時間（荷役時間と入出港時間）が4割以上を占めていることが分かった。

5.2 隻数の増加による減速航海

5.2.1 大型化による隻数増加の減速航海

3.2 節はコンテナ船の大型化が進んでいる状況、4.6 節は大型化による必要隻数の増加を述べた。ここでは大型化による隻数増加の減速航海を考察する。

まず、航路の選択については 5.1 節に示したように、東アジア-北米航路の平均船型が 2018 年に初めて 8,000TEU を超え、これからも大型化していくことが予想される。そのため、東アジア-北米航路の EC1 を考察対象とした。図 5.2.1.1 と表 5.2.1.1 に航路サービスを示す。

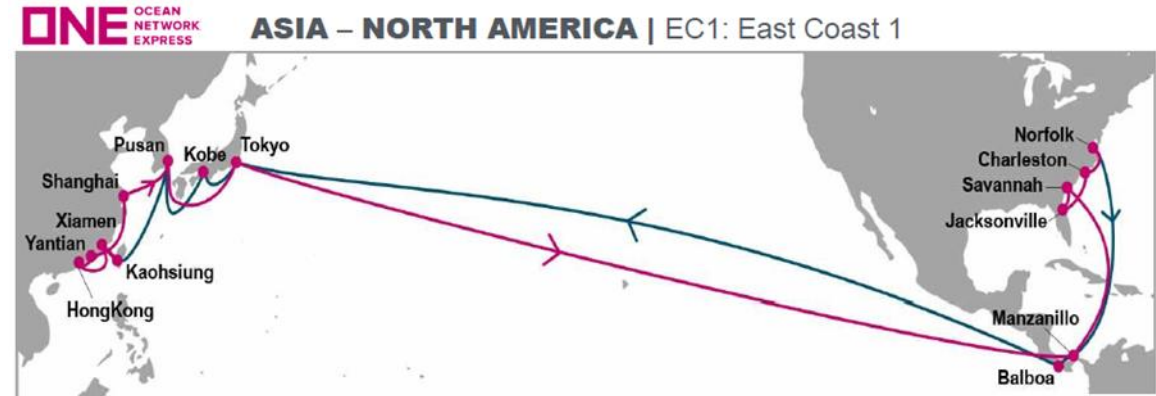


図 5.2.1.1 東アジア-北米航路 EC1 ⁽²⁵⁾

サービス名	距離 (nm)	寄港回数	平均船型 (TEU)	平均速度KT	隻数	1サイクル時間 h	航海時間	停泊時間
EC1	21985	13	6724	24.5	10	1680	897.3469	782.6531

表 5.2.1.1 東アジア-北米航路 EC1 ⁽²⁶⁾

次に、EC1 の平均船型を 6,724TEU から大型化した時の 1 TEU 輸送コストの変化を図 5.2.1.2 に示す。必要隻数は図 5.2.1.3 に示す。

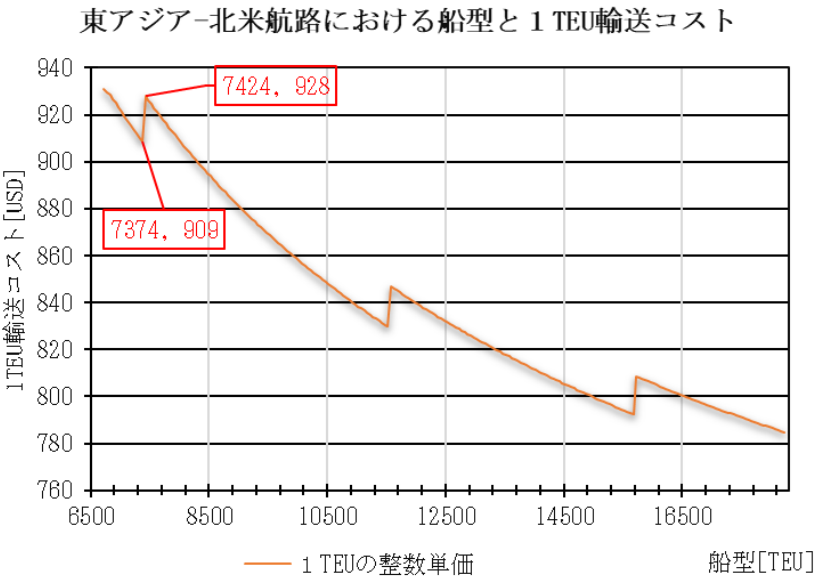


図 5.2.1.2 大型化による輸送コスト変化

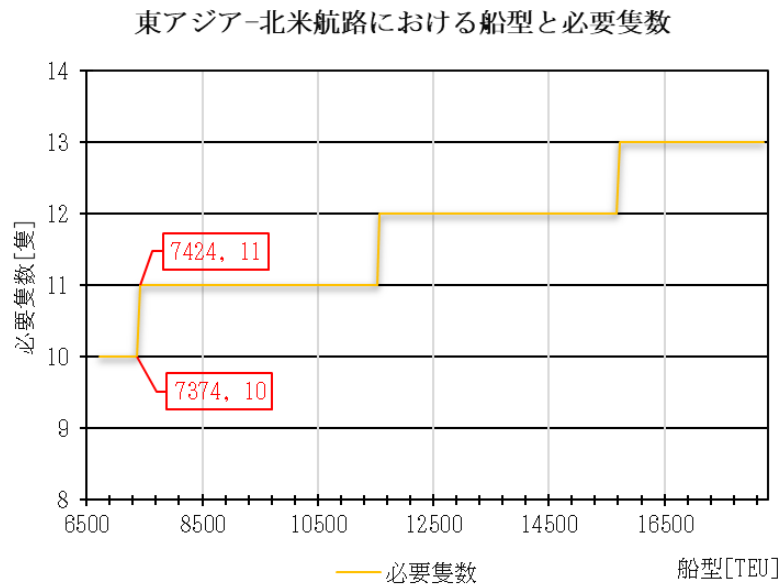


図 5. 2. 1. 3 大型化による必要隻数の変化

7, 374TEU から 7, 424TEU まで 50TEU 増加すると、1 隻の必要隻数が増える。つまり、大型化することで 1 TEU 当たり輸送コストは減少傾向になるが、必要隻数が増加する際に、輸送コストが増加する。また、必要隻数を増加すると隻数が増えた分に対して、1 サイクル時間は図 5. 2. 1. 4 のように 7 日分の時間が増加する。この増加した時間を活用して減速航海を行う。

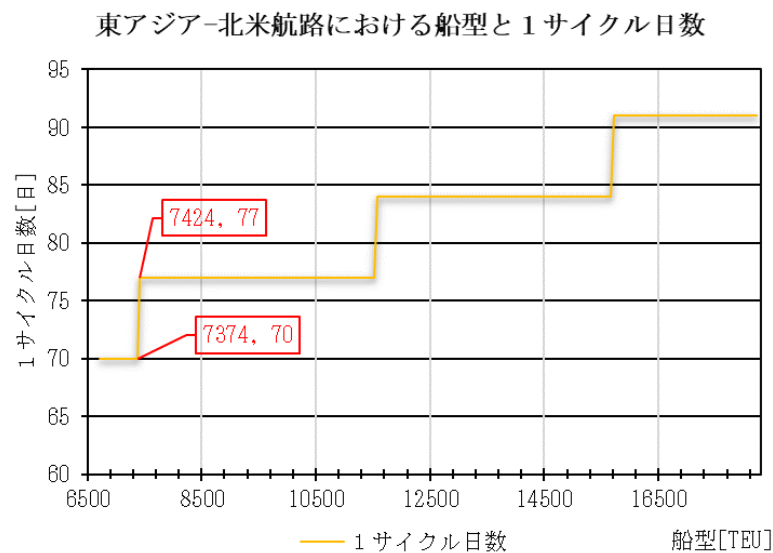


図 5. 2. 1. 4 大型化による 1 サイクル時間の変化

7, 424TEU で必要隻数を維持する場合の減速航海を図 5. 2. 1. 5 に示す。航海速度を 25KT から 21KT まで落としても必要隻数を 11 隻に維持するため、1 サイクル時間は 77 日に一定する。

その結果、1 TEU 当たりの輸送コストが 927.9 ドルから 827.6 ドルまでに減少した。また、輸送コストの削減だけではなく、減速航海による年間 CO₂ 排出量を約 53 万トン減らすことができた。削減効果を表 5.2.1.5 にまとめ、図 5.2.1.6 と図 5.2.1.7 に示す。

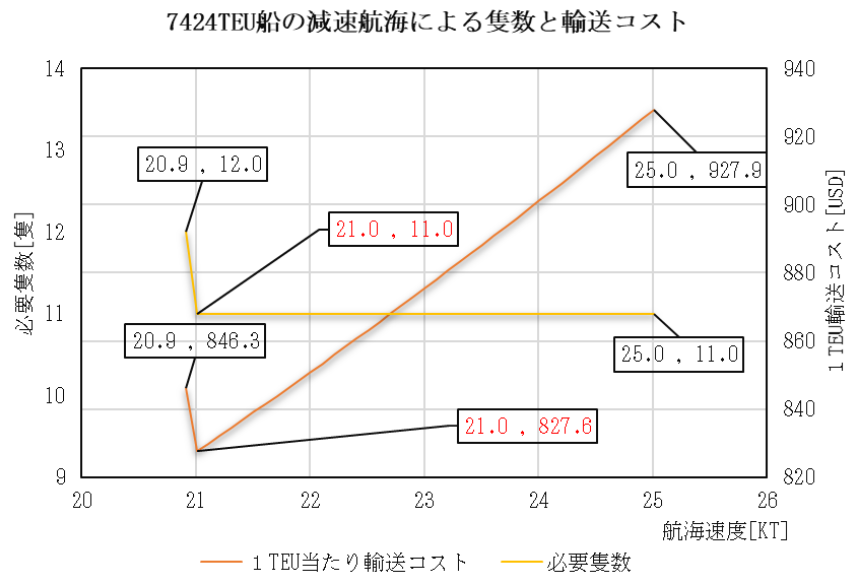


図 5.2.1.5 必要隻数を維持する減速航海（7424TEU）

単位	[KT]	[KT]	[KT]	
	平均速度	減速航海	減速程度	削減効果
東アジア-北米航路EC1	25.01	21.01	4.00	
年間CO2排出量[百万トン]	1.79	1.26		0.53
年間燃料コスト[億USD]	2.64	1.86		0.78
1 TEU当たり輸送コスト[USD]	927.90	827.60		100.30

表 5.2.1.5 削減効果 (7,424TEU)

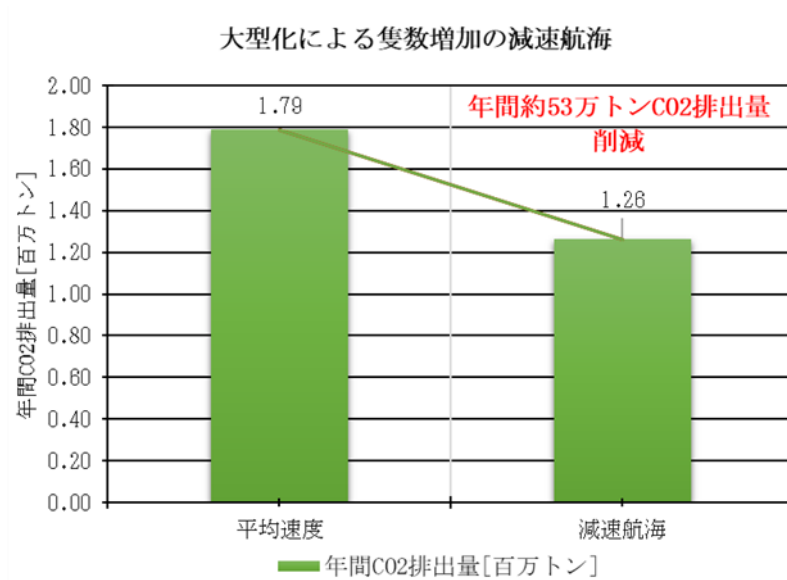


図 5.2.1.6 CO₂排出量の削減効果 (7,424TEU)

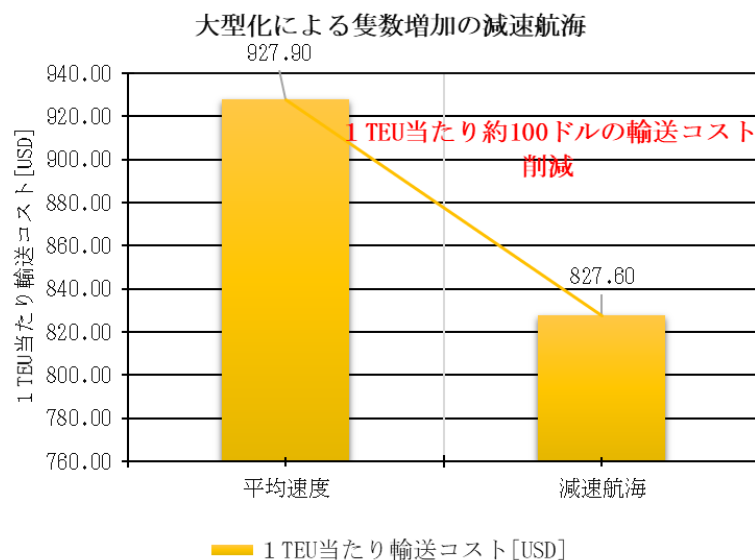


図 5.2.1.7 輸送コストの削減効果 (7,424TEU)

大型化による必要隻数の増加が、サービスに余裕時間をもたらすことが分かった。図 5.2.1.8 に船型の大型化に伴う 1 サイクル余裕時間の変化を示す。

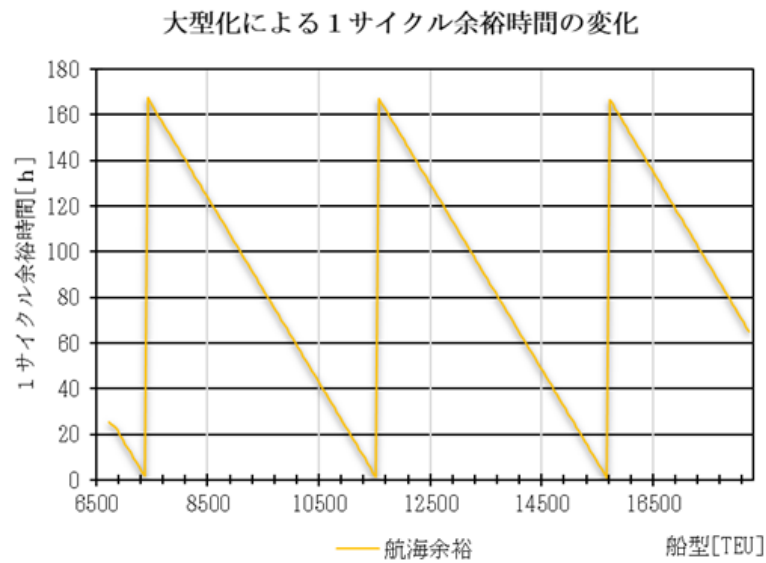


図 5.2.1.8 大型化による 1 サイクル余裕時間の変化

この余裕時間を用いて、図 5.2.1.9 のように減速航海が可能である。また、1 TEU 当たりの輸送コストおよび CO₂ 排出量については、図 5.2.1.10 と図 5.2.1.11 に示す。

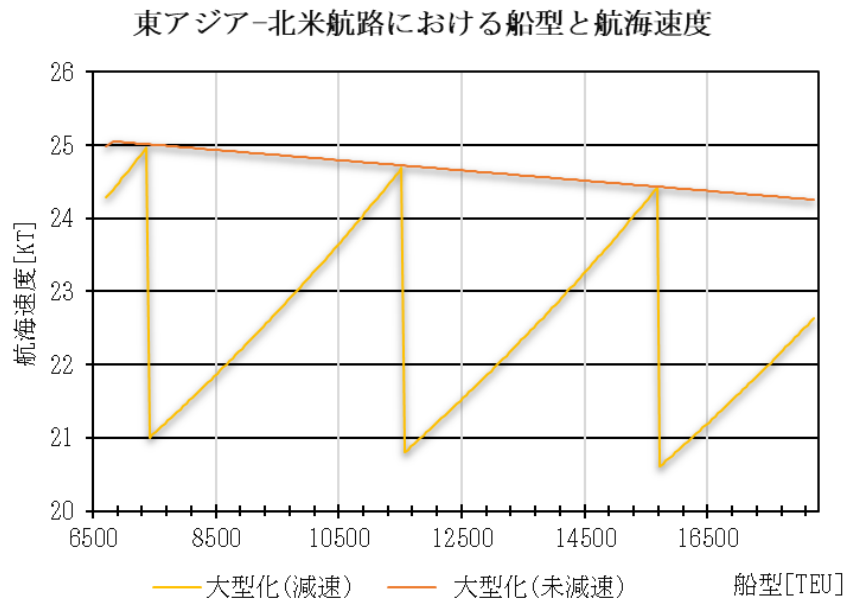


図 5.2.1.9 大型化による隻数増加の減速航海

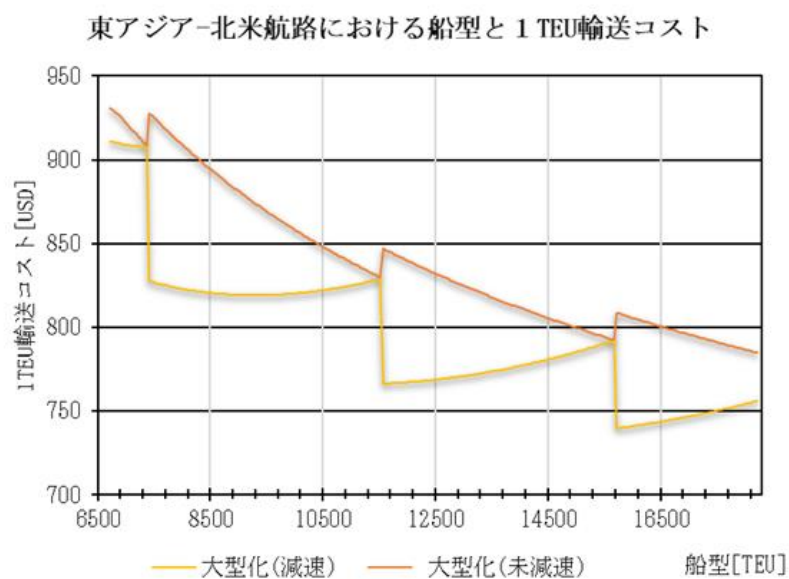


図 5. 2. 1. 10 大型化による隻数増加の減速航海のコスト削減

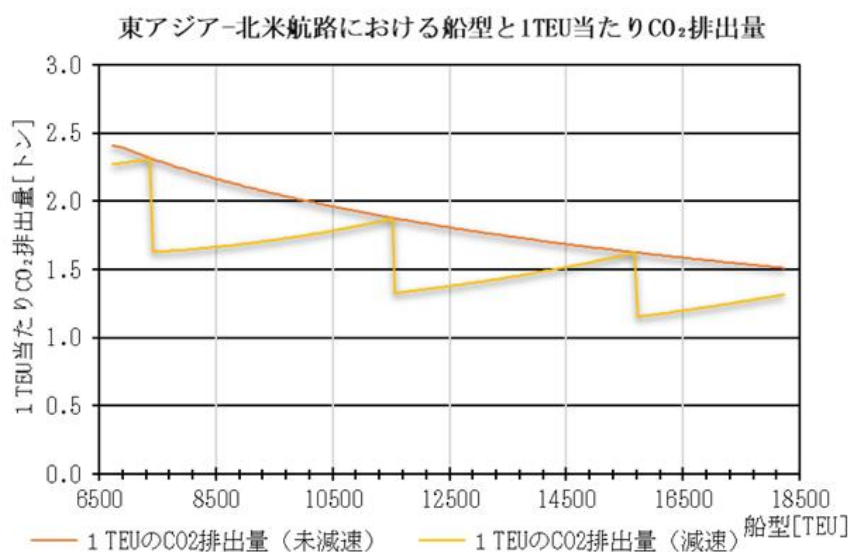


図 5. 2. 1. 11 大型化による隻数増加の減速航海のCO₂排出量削減

以上のことから、航路サービスの船型を大きくした際は輸送能力が向上するため、荷役作業時間が増加し1サイクル時間も増加する。週1回の寄港頻度を維持するために航路サービスを運航する船舶の隻数が増える際、1サイクルの余裕時間は急増するが、荷役時間の増加によってその後減少する。輸送コストおよびCO₂排出量をみると、大型化による隻数増加の際に減速航海の削減効果が最も大きい。

5.2.2 待機船舶の投入による減速航海

ここでは、船型を固定し、3.3 節に述べた待機船舶を投入することによる減速航海の削減効果を考察する。考察対象は平均船型が 20,000TEU 級の東アジア-欧州航路 FAL5 をする。なお、船舶を投入する際に航路サービスのバランスを崩さないため、平均船型が近い航路に投入することが多い。図 5.2.2.1 と表 5.2.2.1 に航路サービスを示す。



図 5.2.2.1 東アジア-欧州航路 FAL5 ⁽²⁷⁾

サービス名	総距離 (nm)	寄港回数	平均船型 (TEU)	平均速度KT	隻数	1サイクル時間 h	航海時間	停泊時間
FAL5	23273.3	12.0	20361.6	19.9	11.0	1848.0	1169.5	678.5

表 5.2.2.1 東アジア-欧州航路 FAL5 ⁽²⁶⁾

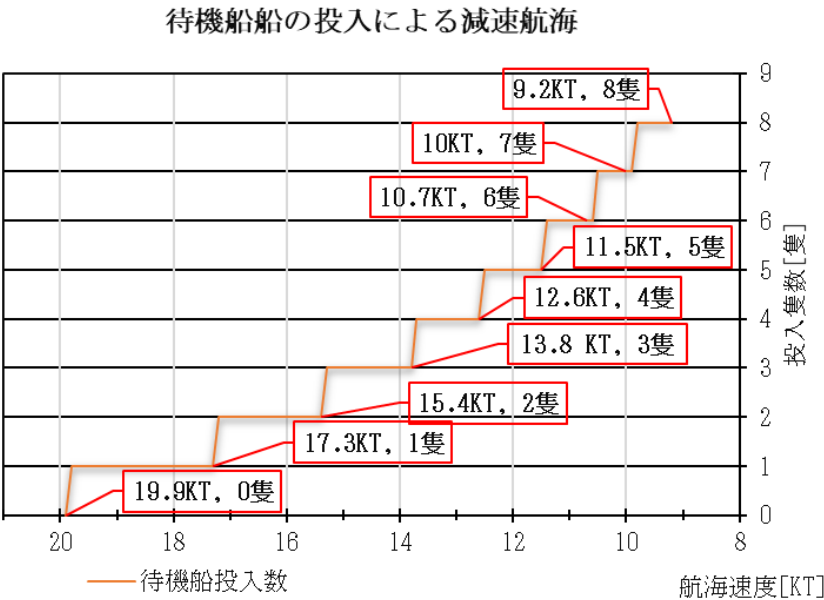


図 5.2.2.2 待機船の投入による減速航海

航海速度の減少によって 1 サイクル時間が増加し、週 1 回寄港のサービス性を維持するた

55

めに、必要隻数が増加することを第4章に述べたが、一方で、待機船舶を投入することで週1回寄港のサービス性を維持し、減速航海ができる。図5.2.2.2は、航路FAL5の11隻をはじめ1隻ずつの船舶を投入した最適航海速度を示している。

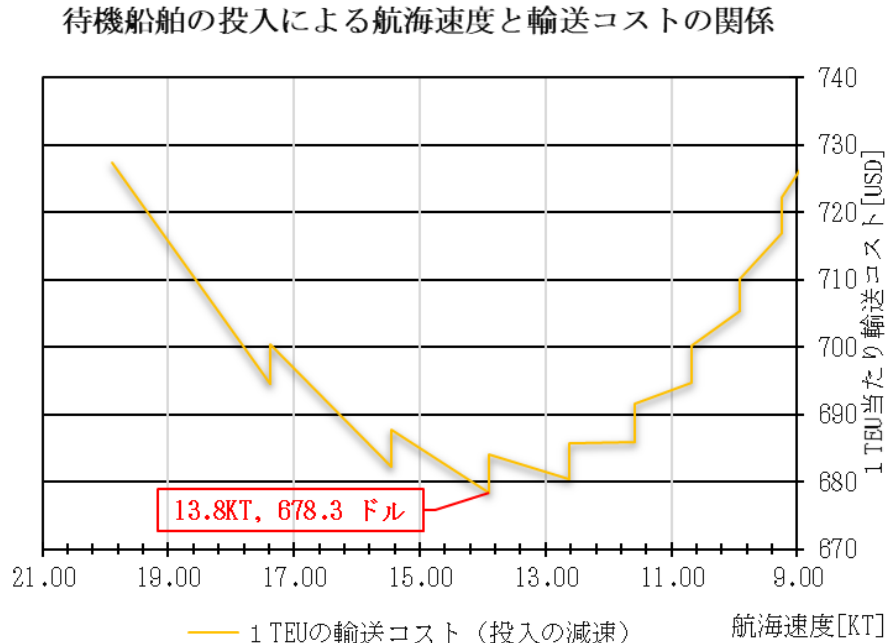


図 5.2.2.3 待機船の投入による減速航海の輸送コスト

しかし、1 TEU 当たり輸送コストの図 5.2.2.3 を見ると、投入隻数が増えると船舶費用が増加している。航路 FAL5 の場合は、3 隻の待機船舶を投入することで輸送コストが最小になる。それ以上の船舶を投入すると、減速航海による燃料コストの削減が船舶費用の増加にカバーができなくなり、輸送コストが増加する。つまり、待機船舶の投入による減速航海については輸送コストの削減限界がある。ここでは、1 隻の待機船舶を投入した削減効果を表 5.2.2.4 にまとめる。図 5.2.2.5 と図 5.2.2.6 に示す。

単位	[KT]	[KT]	[KT]	
	平均速度	減速航海	減速程度	削減効果
東アジア-欧州航路FAL5	19.90	17.40	2.50	
年間CO2排出量[百万トン]	1.55	1.18		0.36
年間燃料コスト[億USD]	2.28	1.75		0.54
1 TEU 当り 輸送コスト[USD]	727.44	700.71		26.73

表 5.2.2.4 待機船舶を 1 隻に投入の削減効果

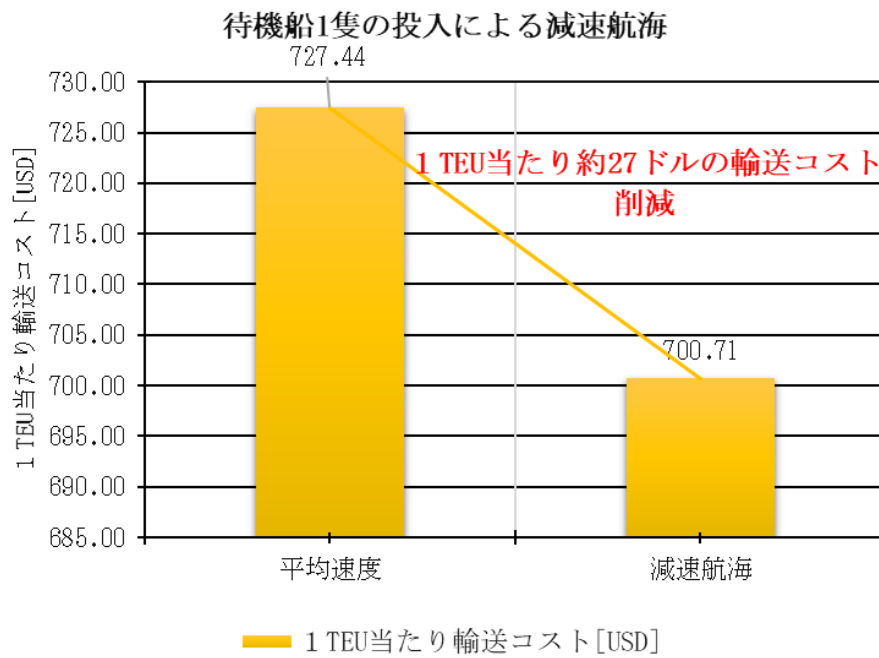


図 5.2.2.5 待機船舶を1隻に投入の輸送コスト削減

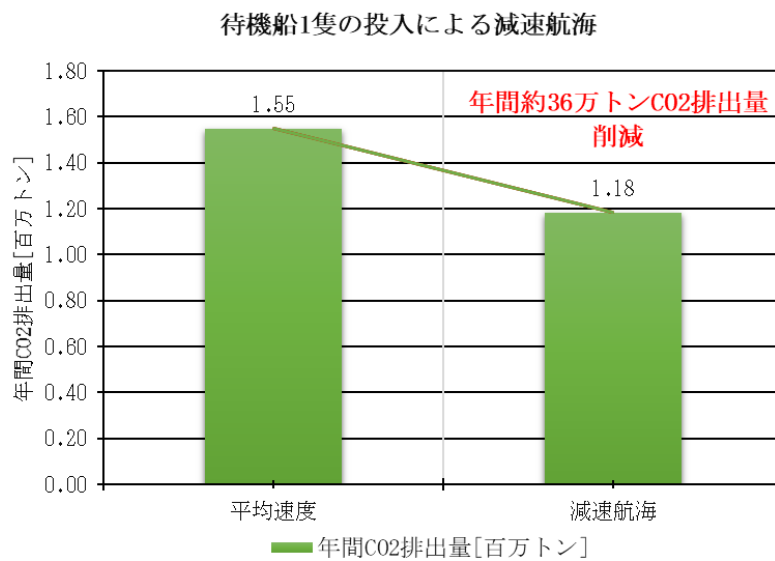


図 5.2.2.6 待機船舶を1隻に投入のCO₂排出量の削減

5.3 航路の1サイクル余裕時間の考察

ここでは、第4章の回帰分析のモデルを用いて、主要航路の1サイクル余裕時間を分析する。国際輸送ハンドブックに記載された1サイクル時間はモデルで推計した時間と比較し、航路サービスの余裕時間を確認する。

5.3.1 主要航路の余裕時間について

航路	観測航路数	余裕あり	割合	平均余裕時間
東アジア-北米航路	48.0	18.0	38%	72.3
東アジア-欧州航路	33.0	19.0	58%	47.2
欧州-北米航路	18.0	11.0	61%	62.1

表 5.3.1 主要航路における1サイクル余裕時間

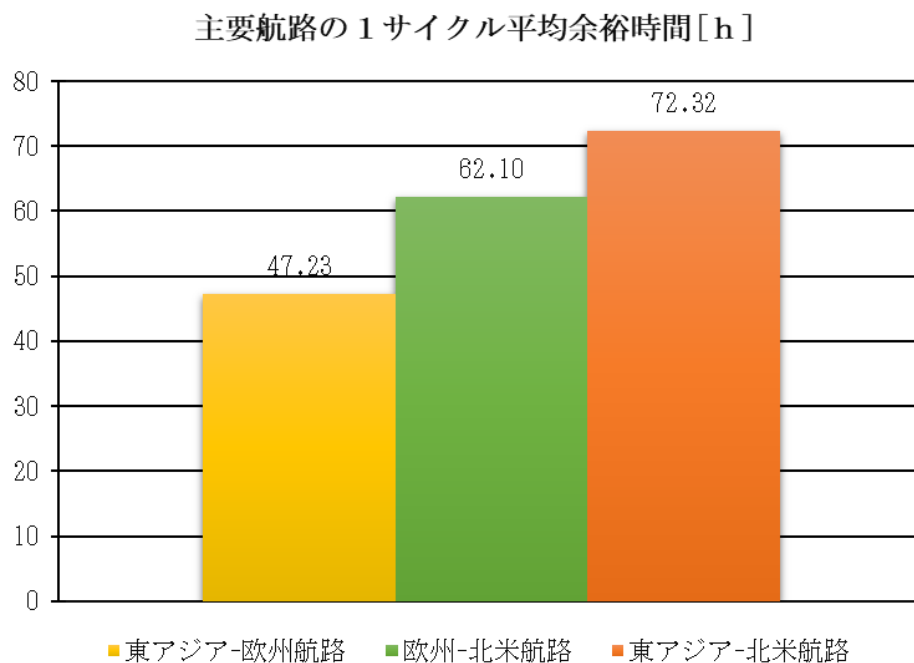


図 5.3.1 主要航路における1サイクルの平均余裕時間

表 5.3.1 は主要航路における1サイクル余裕時間を示す。東アジア-北米航路の余裕ありサービス数の割合が38%と少ないが、72時間の平均余裕時間がある。東アジア-欧州航路は、余裕ありサービス数の割合が58%と多いが、平均余裕時間が47時間である。現存の航路サービスが余裕時間を持つことが分かった。荷役作業の遅れや入出港の沖待ちに対応すると考えられる。

5.3.2 余裕時間による減速航海

次に、平均余裕時間が多い東アジア-北米航路における、減速航海を考察する。対象は 5.2.1 節に説明した EC1 とする。隻数を維持した減速航海の程度を表 5.3.2.1 に示す。

サービス名	総距離(nm)	寄港回数	平均船型 (TEU)	平均速度KT	隻数	1サイクル時間 h	航海時間	停泊時間	荷役時間	入出港時間
EC1	21985.0	13.0	6724.0	24.5	10.0	1680.0	897.3	782.7		
モデル	21985.0	13.0	6724.0	23.7	10.0	1680.0	925.7	754.3	225.3	529.0

表 5.3.2.1 東アジア-北米航路 EC1 余裕時間による減速航海

航路サービス EC1 については、モデルで推計すると 1 サイクルにおよそ 28 時間の余裕が生じる。その時間を航海時間に加えた減速航海は、0.75KT の減速程度である。わずか 0.75KT にしても年間の削減効果は大きいと言える。表 5.3.2.2 に減速航海による削減効果をまとめ、図 5.3.2.3 と図 5.3.2.4 に示す。このように、港湾などでの遅れをなくすことで余裕時間の設定が必要なく、減速航海への期待がある。

単位	[KT]	[KT]	[KT]	
	平均速度	減速航海	減速程度	削減効果
東アジア-北米航路EC1	24.50	23.75	0.75	
年間CO2排出量[百万トン]	1.62	1.52		0.10
年間燃料コスト[億USD]	2.39	2.25		0.14
1 TEU当たり 輸送コスト[USD]	916.97	896.36		20.61

表 5.3.2.2 EC1 余裕時間による減速航海のまとめ

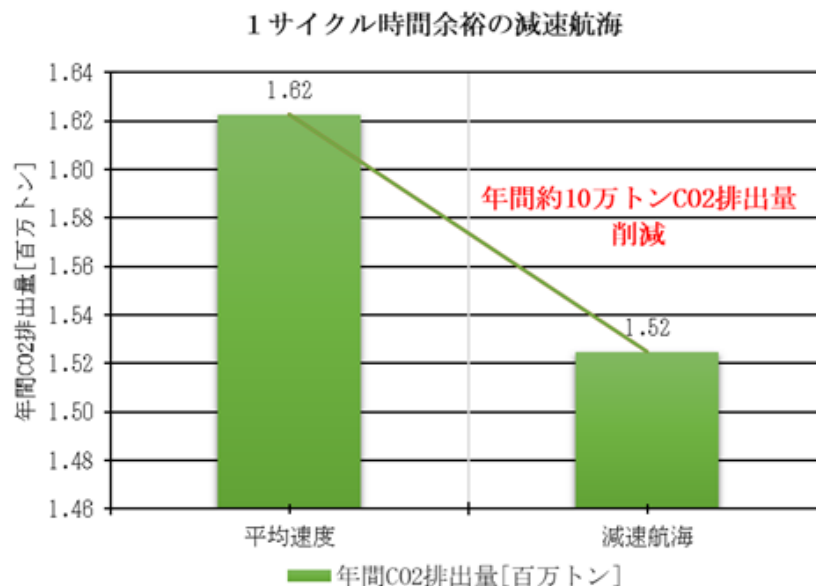


図 5.3.2.3 EC1 余裕時間による減速航海の CO₂削減効果

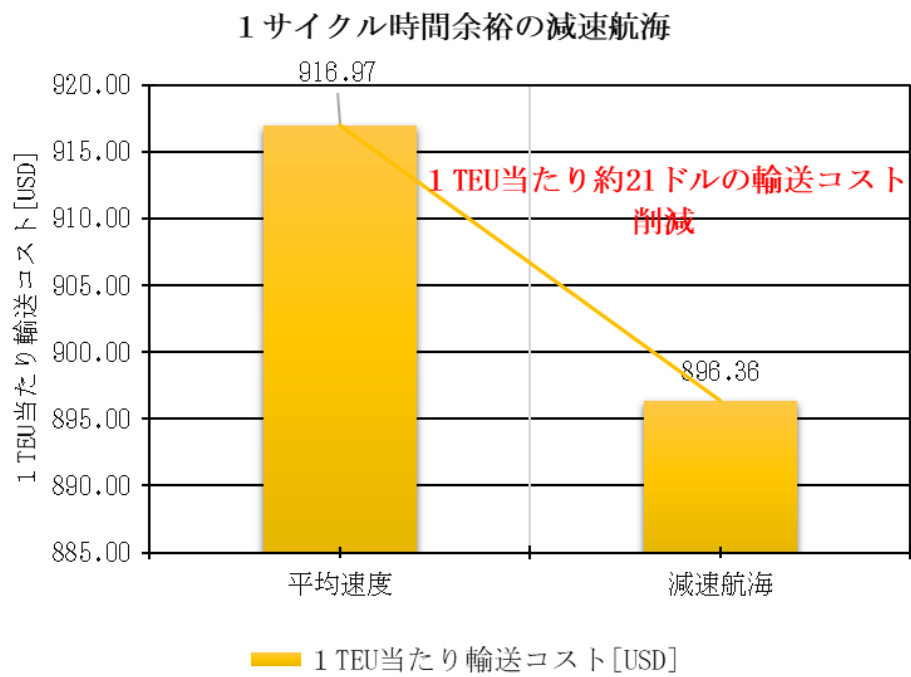


図 5.3.2.4 EC1 余裕時間による減速航海の輸送コスト削減効果

5.4 停泊時間の短縮への考察

5.1 節で述べたように停泊時間が1サイクル時間に占める割合は高く、ここでは1サイクル時間に占める停泊時間の短縮可能性を考察する。停泊時間の短縮による減速航海は、航路サービスの利用者（荷主）にとってはリードタイムの増加が発生しない。つまり、定期航路のサービス性を維持することができる。

5.4.1 荷役時間の短縮による減速航海

まず、停泊時間に構成される荷役時間についての考察を行う。表 5.4.1 のように、国際輸送ハンドブックにコンテナ取扱量の上位 50 位までの港を抽出して、港湾の荷役作業効率を分析する。

順位	port	範囲	取扱量百万TEU
1	shanghai	東アジア側	40.23
2	singapore	東アジア側	33.67
3	shenzhen	東アジア側	25.21
45	vancouver	北米側	3.25
46	rizhao	東アジア側	3.22
47	marsaxlokk	欧州側	3.15
48	ambarli	欧州側	3.12
49	Incheon	東アジア側	3.04
50	fuzhou	東アジア側	3.01

表 5.4.1 各航路の港湾コンテナ取扱量（2017 年）⁽²⁸⁾

図 5.4.2 は各地域範囲別の港湾コンテナ取扱量を示す。図 5.4.3 は各港湾のターミナルにおける荷役作業機器（クレーン）の所有数を示す。

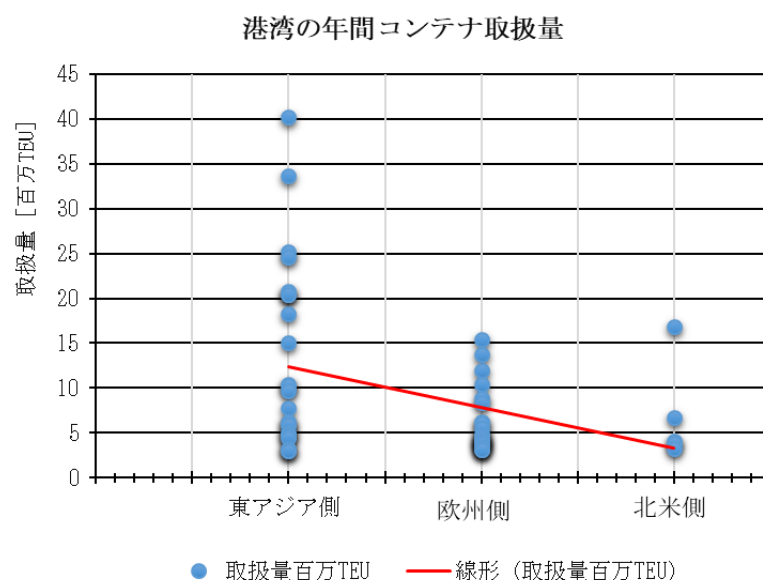


図 5.4.2 各地域範囲別の港湾コンテナ取扱量 ⁽²⁶⁾

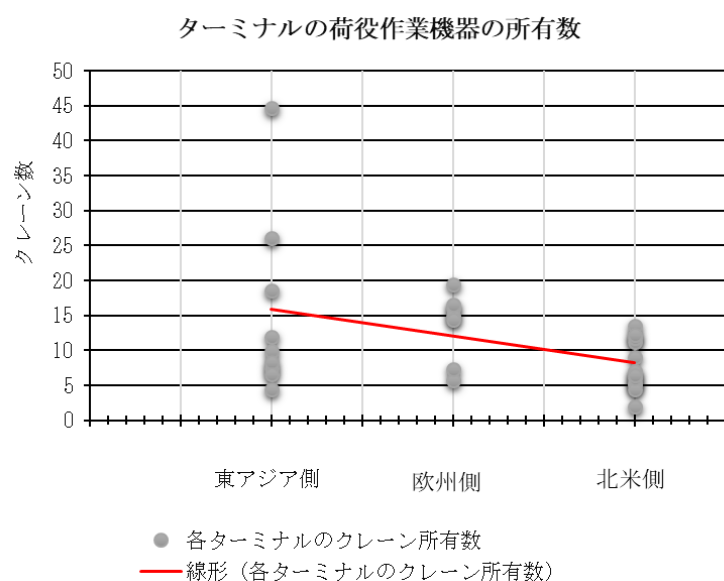


図 5. 4. 3 各地域範囲別のターミナルにおける荷役作業機器の所有数 ⁽²⁶⁾

港湾の年間コンテナ量について、東アジア側の港湾の方が高く、1ターミナル当たりの荷役作業機器（クレーン）の所有数が多い。東アジア側の港湾の荷役効率が低い水準になっていることが考えられる。同様に、北米側の港湾の荷役効率が比較的低いことが考えられる。

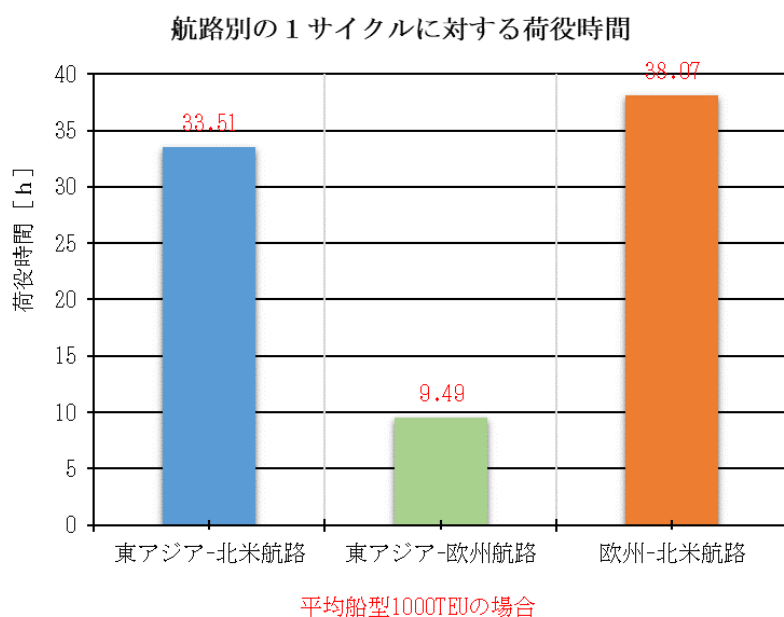


図 5. 4. 4 各航路における 1000TEU の荷役時間

また、表 4. 2. 1b のモデル係数を用いて平均船型が 1000TEU のサービスの場合は、1サイクル運航する際に荷役作業時間の推計値を図 5. 4. 4 に示す。図を見ると、東アジア-欧州航路の1サイクルに対する荷役作業時間が最も短くなり、欧州-北米航路の1サイクルに対する荷役作業時間が最も長いことが分かった。前文で考察したように、港湾の荷役作業効率については

北米側が最も低く、東アジア側と欧州側と比較すると、東アジア側の方が高いことが分かった。

そして、北米側における港湾の荷役作業効率を調査することにした。荷役作業効率の設定について、国際港湾政策研究所⁽²⁹⁾では、コンテナターミナルのサービス水準を調査した。本節では、その調査結果を用い、研究対象とした航路において、荷役作業時間の短縮可能性を考察する。

	取扱量	ターミナル数	バース数	クレーン数	バース当たりクレーン投入可能数
port	TEU	個	個	個	個
prince rupert	926540	1.0	2.0	7.0	3.5
everett	5798	1.0	1.0	2.0	2.0
seattle/tacoma	3702175	9.0	18.0	47.0	2.6
portland	1725	1.0	3.0	9.0	3.0
oakland	2420836	8.0	18.0	36.0	2.0
houston	2459107	2.0	10.0	27.0	2.7
new orleans	526703	1.0	2.0	6.0	3.0
long beach/los angeles	16890000	13.0	47.0	150.0	3.2
new york	6710000	6.0	23.0	73.0	3.2
savannah	4050000	1.0	9.0	26.0	2.9
vancouver	3250000	4.0	14.0	26.0	1.9
平均値	3722080	4.3	13.4	37.2	2.7

表 5.4.5 北米側港湾における荷役機器の状況⁽²⁶⁾

まず、平均荷役作業効率が比較的低い北米側の港湾を考察対象にする。表 5.4.5 に北米側港湾における荷役機器の状況を示す。また、国際港湾政策研究所が調査したコンテナターミナルのサービス水準⁽²⁴⁾で、ガントリークレーンの荷役効率の平均値 34.14[BOX/h/基]を用いて、北米側の港湾荷役作業効率の推計を行い、表 5.4.6 に示す。

	荷役作業効率
port	BOX/h
prince rupert	119.50
everett	68.29
seattle/tacoma	89.15
portland	102.43
oakland	68.29
houston	92.19
new orleans	102.43
long beach/los angeles	108.97
new york	108.37
savannah	98.63
vancouver	63.41
平均値	92.88

表 5.4.6 北米側港湾における荷役作業効率の推計

ここでは、北米側の港湾における荷役作業効率を平均値の 92.88[BOX/h]とする。また、コンテナの BOX 数について 3.3.3 節のコンテナ・フリートを用いて、表 5.4.7 に計算例を示す。

船型TEU	BOX数
500	330
1000	660
2000	1320
3000	1980
4000	2640

表 5.4.7 船型によるコンテナ本数（計算例）

北米側の各港湾における荷役作業効率の推計平均値を用いて、北米側の港湾が影響する東アジア-北米航路、欧州-北米航路を対象とする。コンテナのフリートを考慮した推計荷役時間とモデルの荷役時間を比較し、余裕時間を考察する。また、その余裕時間を減速航海に活用した削減効果を明らかにする。

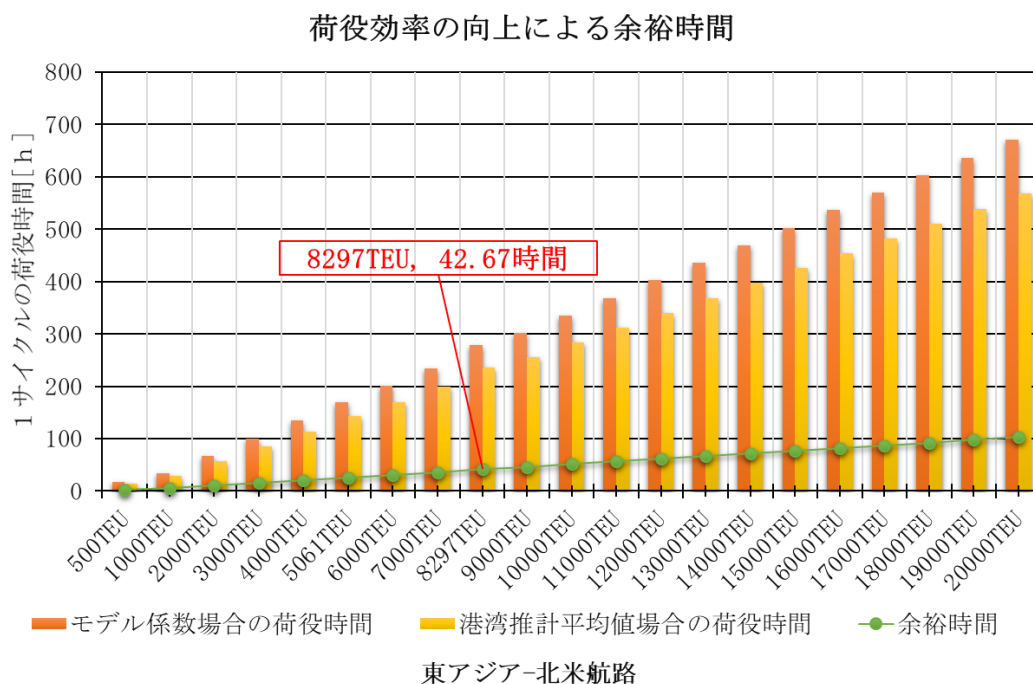


図 5.4.8 東アジア-北米航路の荷役時間の変化

単位	[KT]	[KT]	[KT]	
	平均速度	減速航海	減速程度	削減効果
東アジア-北米航路	24.95	23.51	1.44	
年間CO2排出量[百万トン]	1.50	1.33		0.17
年間燃料コスト[億USD]	2.21	1.96		0.25
1 TEU当たり輸送コスト[USD]	667.39	642.62		24.76

表 5.4.8 荷役作業効率の向上による減速航海の削減効果

東アジア-北米航路では、平均船型が 8297TEU になるため荷役作業効率を北米側港湾の平均推計値に設定すると、42.67 の余裕時間が生じている。その余裕時間を航海時間に加え、減速航海の削減効果は表 5.4.8 に示す。

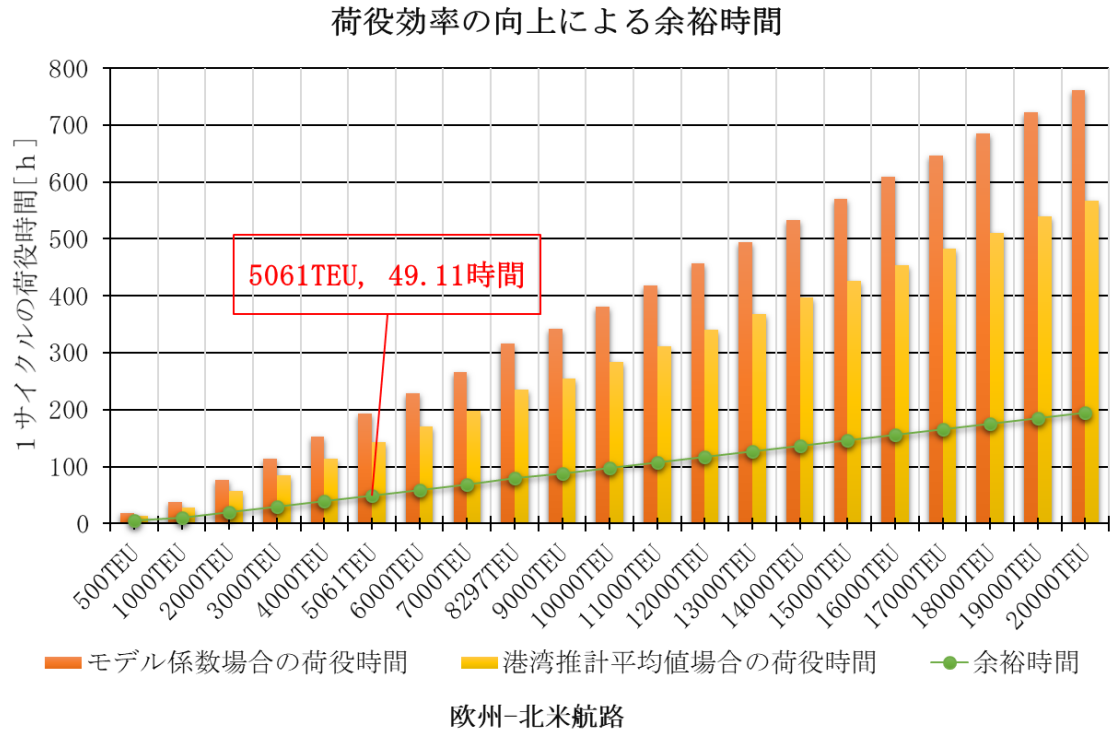


図 5.4.9 欧州-北米航路の荷役時間の変化

単位	[KT]	[KT]	[KT]	
	平均速度	減速航海	減速程度	削減効果
欧州-北米航路	23.99	21.54	2.44	
年間CO2排出量[百万トン]	0.76	0.58		0.18
年間燃料コスト[億USD]	1.13	0.86		0.27
1 TEU当たり輸送コスト[USD]	668.56	646.70		21.86

表 5.4.9 荷役作業効率の向上による減速航海の削減効果

欧州-北米航路では、平均船型が 5061TEU になるため荷役作業効率を北米側港湾の平均推計値に設定すると、49.11 の余裕時間が生じている。その余裕時間を航海時間に加え、減速航海の削減効果は表 5.4.9 に示す。

以上のことから、1.「北米側の港湾の荷役効率を平均値まで向上すること」、2.「寄港地を荷役作業能力が高い港に選択すること」により、東アジア-北米航路では約 15%、欧州-北米航路では約 25%の荷役作業時間の削減を期待される。また、削減された時間を減速航海に活用することで必要隻数を増やさずに輸送コスト及び CO₂ 排出量の削減ができる。

東アジア-欧州航路については、荷役時間が 1 サイクル時間に占める割合がわずか 8%であり、また欧州及び東アジア側の港湾の荷役作業効率すでに高く水準になっているため、荷役作業時間の短縮による考察は行わない。

5.4.2 入出港時間の短縮による減速航海

ここでは、停泊時間に構成される入出港時間の短縮による減速航海の削減効果について考察する。

5.1 節の1 サイクル時間構成を見ると、航路によって入出港時間が異なるが、少なくとも2 割以上を占めている。東アジア-欧州航路が最も多く 36%を占めている。既存研究の調査⁽³⁰⁾によると、船舶は入出港する際に、沖待ちが発生する。沖待ち船舶について、ほとんどは半日および1 日の長い沖待ちになる傾向があった。

そのため、世界一のスマート港湾を目指してロッテルダム港では Just-in-time sailing⁽³¹⁾ というシステムを導入した。ロッテルダム港湾庁とオランダ応用科学研究機構 (Netherlands Organisation for applied scientific research TNO) が最近委託した調査報告書⁽³¹⁾ によれば、入港してくる船舶に対し、到着 12 時間前に使用予定の岸壁がいつ空くか正確な時間情報を提供ができれば、正確な到着予定時刻に対応して船舶が運航速度を 5%程度減速することが可能となり、燃料消費量と CO₂ 排出量を削減できることが明らかになった。この調査結果は、10 月 15 日から IMO で開催された「船舶から排出される GHG 削減のための中間作業部会」にも提出された。世界海事エネルギー効率化パートナーシップ (Global Maritime Energy Efficiency Partnership: GloMEEP) の専門家等から、「岸壁使用可能時刻の正確な告知によって削減できる GHG は排出量全体の 4%と割合的には見ればわずかな比率であるが、GHG 削減のために直ちに組み入れる対策として有意義であるとともに、船社のコスト削減も併せて図れる点で受け入れられやすい対策である。」と評価された⁽³³⁾。

そこで、本節では各航路の入出港時間の短縮による減速航海の削減効果を考察する。

① 入出港時間が 1 %に短縮した場合

単位	[KT]	[KT]		
	平均速度	減速航海	減速程度	削減効果
東アジア-北米航路	24.95	24.85	0.09	
年間CO2排出量[百万トン]	1.50	1.48		0.01
年間燃料コスト[億USD]	2.21	2.19		0.02
1 TEU当たり輸送コスト[USD]	671.27	665.48		5.79
	平均速度	減速航海	減速程度	削減効果
東アジア-欧州航路	24.59	24.43	0.16	
年間CO2排出量[百万トン]	2.41	2.38		0.03
年間燃料コスト[億USD]	3.56	3.52		0.05
1 TEU当たり輸送コスト[USD]	762.61	755.49		7.12
	平均速度	減速航海	減速程度	削減効果
欧州-北米航路	23.99	23.84	0.15	
年間CO2排出量[百万トン]	0.63	0.62		0.01
年間燃料コスト[億USD]	0.93	0.92		0.01
1 TEU当たり輸送コスト[USD]	586.56	580.32		6.24

表 5.4.2.1 入出港時間が 1 %に短縮した場合の削減効果

② 入出港時間が5%に短縮した場合

単位	[KT]	[KT]		
	平均速度	減速航海	減速程度	削減効果
東アジア-北米航路	24.95	24.49	0.46	
年間CO2排出量[百万トン]	1.50	1.44		0.05
年間燃料コスト[億USD]	2.21	2.13		0.08
1 TEU当たり輸送コスト[USD]	671.27	658.06		13.21
	平均速度	減速航海	減速程度	削減効果
東アジア-欧州航路	24.59	23.82	0.76	
年間CO2排出量[百万トン]	2.41	2.27		0.15
年間燃料コスト[億USD]	3.56	3.34		0.22
1 TEU当たり輸送コスト[USD]	762.61	743.26		19.36
	平均速度	減速航海	減速程度	削減効果
欧州-北米航路	23.99	23.27	0.72	
年間CO2排出量[百万トン]	0.63	0.59		0.04
年間燃料コスト[億USD]	0.93	0.87		0.05
1 TEU当たり輸送コスト[USD]	586.56	572.09		14.47

表 5.4.2.1 入出港時間が5%に短縮した場合の削減効果

③ 入出港時間が10%に短縮した場合

単位	[KT]	[KT]		
	平均速度	減速航海	減速程度	削減効果
東アジア-北米航路	24.95	24.04	0.90	
年間CO2排出量[百万トン]	1.50	1.39		0.11
年間燃料コスト[億USD]	2.21	2.05		0.16
1 TEU当たり輸送コスト[USD]	671.27	649.24		22.03
	平均速度	減速航海	減速程度	削減効果
東アジア-欧州航路	24.59	23.11	1.48	
年間CO2排出量[百万トン]	2.41	2.13		0.28
年間燃料コスト[億USD]	3.56	3.15		0.41
1 TEU当たり輸送コスト[USD]	762.61	729.18		33.43
	平均速度	減速航海	減速程度	削減効果
欧州-北米航路	23.99	22.59	1.40	
年間CO2排出量[百万トン]	0.63	0.56		0.07
年間燃料コスト[億USD]	0.93	0.82		0.10
1 TEU当たり輸送コスト[USD]	586.56	562.59		23.97

表 5.4.2.1 入出港時間が10%に短縮した場合の削減効果

入出港時間の短縮による減速航海の削減効果を見ると、東アジア-欧州航路はサービス航路の平均寄港回数が多く、入出港時間が1サイクル時間に占める割合が大きい。そのため、入出港時間の短縮による減速航海の削減効果が最も大きい航路になる。

5.5 考察のまとめ

ここでは、第5章に述べた3つの手法（必要隻数の増加、サービス航路の余裕時間、停泊時間の短縮）による減速航海を環境面（CO₂排出量）、サービス提供者（海運会社）及び利用者（荷主）の視点で評価し、表5.5に示す。

手法	視点	環境面	海運会社		荷主
	項目	CO ₂ 排出量	輸送コスト	必要隻数	リードタイム
必要隻数の増加	大型化による増加	◎	◎	△	△
	待機船舶の投入	◎	◎	○	△
停泊時間の短縮	荷役効率の向上	◎	◎	○	○
	入出港時間の短縮	○	○	○	○
1 サイクル余裕時間	余裕あり	○	○	○	—
	余裕無し	—	—	—	—
評価					
良い	◎				
やや良い	○				
変化無し	—				
良くない	△				

表 5.5 3つの手法による減速航海の評価

● 必要隻数の増加

① 大型化による増加

船舶の大型化の際に、減速航海によるCO₂排出量及び輸送コスト削減効果が最も大きい。しかし、船舶の大型化に伴い荷役時間が増加することで、週1回の寄港頻度を維持するために隻数の増加が必要となる。また荷主にとっては、1サイクル時間の増加による貨物のリードタイムが長くなるため、在庫管理へ一定のダメージが生じる。

② 待機船舶の投入

待機船舶を投入する際に、減速航海によるCO₂排出量及び輸送コスト削減効果も大きく、海運会社にとっても余剰船舶の活用というメリットがある。しかし、待機船舶の投入による減速航海については輸送コストの削減限界がある。また、大型化と同じくリードタイムが長くなり、荷主に在庫管理へ一定のダメージが生じる。

● 停泊時間の短縮

① 荷役効率の向上

港湾の荷役作業効率を向上させると、荷役時間の短縮ができるため、減速航海によるCO₂排出量及び輸送コスト削減効果は比較的大きい。荷主にとっては、リードタイムを増加せず、在庫管理へダメージがない。なお、北米側の港湾に対する荷役作業効率の向上余地が多く、東アジア-北米航路及び欧州-北米航路への削減効果を期待できる。

② 入出港時間の短縮

港湾の整備による入出港時間の短縮の実現可能性がある。減速航海によるCO₂排出量及び輸送コスト削減効果について、東アジア-欧州航路の寄港回数が比較的多くため、ある程度に期待できる。荷主にとっては、リードタイムを増加せず、在庫管理へダメージがない。

● 1 サイクル余裕時間

1 サイクル余裕時間は航路サービスを設計する際に、海運会社が船舶の運航中で発生する荷役作業や沖待ちなどの遅れに対応手段として存在する。しかし、航路サービスは海運市場の変動に影響にやすく、コンテナの荷動きも時期による変化すると考えられる。そのため航路によって、1 サイクル余裕時間は存在するが、全ての航路に適用することは考えにくい。

6. おわりに

6.1 本研究のまとめ

本研究では、近年、コンテナ船の大型化が進んでいることで CO₂排出量削減に対する最も有効な対策の1つとする減速航海の影響を明らかにした。

第4章で主要定期航路を対象として、各航路の現状を考慮した上で輸送サービスを構成するコンテナ船の船型、寄港回数、必要隻数、航海速度などの構成要素間の関係をモデル化した。このモデルを用いて1サイクル時間を推計することで、コンテナ船の大型化と減速航海が必要隻数に影響を与え、CO₂排出量及び輸送コストの削減効果を明らかにした。その感度分析の結果、次のようなことが分かった。

- (1) 船舶の大型化により、1 TEU 当たりの輸送コストおよび CO₂排出量を削減することができる。
 - (2) 減速航海による CO₂排出量の削減ができる。また、輸送コストについては、航海距離及び船型 TEU による輸送コスト最小にする航海速度が存在することが分かった。
- 第5章で3つの手法（必要隻数の増加、サービス航路の余裕時間、停泊時間の短縮）による減速航海の削減効果を検討した。その考察の結果、次のようなことが分かった。
- (3) コンテナ船を大型化する際に、必要隻数の増加に伴う減速航海を可能にし輸送コストおよび CO₂排出量の削減効果が最も大きいことが分かった。
 - (4) 待機船舶の投入による減速航海は CO₂排出量及び輸送コストの削減ができる。しかし、輸送コストの削減限界がある。
 - (5) 1 サイクル余裕時間は航路サービスを設計する際に、海運会社が船舶の運航中で発生する荷役作業や沖待ちなどの遅れに対応手段として存在する。
 - (6) 各航路の1 サイクル時間の構成から、停泊時間が占める割合が高いことが分かった。
 - (7) 港湾の荷役作業効率についての考察では、北米側における港湾荷役効率が比較的低いことが分かった。そのため、「北米側の港湾の荷役効率は平均値まで向上すること」と「寄港地を荷役作業能力が高い港に選択すること」により、リードタイムを維持した減速航海ができ、CO₂排出量及び輸送コストの削減効果が高いことが分かった。
 - (8) 入出港時間の短縮による減速航海については、東アジア-欧州航路の寄港回数が多く入出港時間も長く、欧州側における入出港のスムーズ化の検討が必要と分かった。

6.2 今後の課題

- (1) 本研究ではCO₂排出量及び輸送コストについて、先行研究の計算式を用いて推計を行った。IMOのGHG削減戦略によって2020年に船舶の運航実績データが報告される。より良い検討するため、船舶の運航実績データを用いる再検討が必要とされる。
- (2) 港湾における荷役作業効率について、本研究では北米側のみ考察したが、東アジア側及び欧州側の荷役作業効率の考察も必要である。
- (3) 待機船舶については、全体的の調査を用いる考察をしたが実際に海運アライアンスの再編やコンテナの荷動きにより待機船舶の変動が激しく、より現実的な調査が必要である。
- (4) 入出港時間の短縮について、本研究では仮定の短縮により減速航海の削減効果を表したが、各港湾の整備状況に応じた入出港時間の検討が必要である。

謝辞

本論文を作成するにあたり、ご指導・ご協力をいただいた方々に感謝の意を表します。

研究及び本論文の作成にあたり、平日・休日を問わずに終始有益なる熱意あるご指導、ご鞭撻を賜りました黒川久幸先生に深く御礼申し上げます。

また、公私共々お世話になった博士課程の梅さん、修士課程の影山さん、廖さん、趙さん、李さん、安さん、研究生の土屋さん、Kaung さん、学部四年生の石原さん、浮谷さん、小木曾さん、小島さん、股部さん、学部三年生の藤谷さん、長谷さん、三國さんから多大なご協力と励ましをいただきました。紙面を借りてお礼を申し上げます。

参考文献

- (1) IEA、国際エネルギー機関報告書
(<https://www.iea.org/>)
- (2) 国土交通省 海事局、2020 年 SOx 規制適合船用燃料油使用手引書、2019 年
- (3) 黒川 久幸、高野 智貴、鈴木 理沙、国際海上コンテナ輸送における CO₂ 排出量削減策の実行可能性に関する研究、日本航海学会論文集、2011 年
- (4) 池上 寛 編、アジアにおける海上輸送と中韓台の港湾、pp. 2-41 アジア経済研究所、2013 年
- (5) JSA 一般社団法人日本船主協会 HP より作成
- (6) 日本郵船調査グループ編、世界のコンテナ輸送と就航状況、2018 年度版
- (7) JSA 一般社団法人日本船主協会、海運業界の環境問題
(https://www.jsanet.or.jp/environment/kankyo_info.html)
- (8) Third IMO GHG Study 2014
(https://www.cedelft.eu/publicatie/third_imo_ghg_study_2014/1525)
- (9) OPRI 海洋政策研究対所、国際海運からの温室効果ガス排出ゼロに向けて、国際海事機関 (IMO) 海洋環境保護委員会 (MEPC) 斎藤英明、2018 年
- (10) 国土交通省、海事行政の重要課題、海事レポート 2016 年
- (11) 船舶から排出される温室効果ガス (GHG) 削減に関する IMO 戦略、
(<http://www.mlit.go.jp/common/001250101.pdf>)
- (12) 一般社団法人環境金融研究機構による翻訳、
(<https://www.poseidonprinciples.org/#home>)、2019 年
- (13) 公益財団法人日本海事センター、SHIPPING NOW データ編 2017-2018、p. 36.
- (14) 日本郵船調査グループ編、世界のコンテナ輸送と就航状況、2018 年度版、p. 6-12.
- (15) 松田 琢磨、世界経済とコンテナ市場の動向、日本海事新聞 201902
- (16) 日本郵船調査グループ編、世界のコンテナ輸送と就航状況、2013-2018
- (17) ウィキペディア：主な海上コンテナの全長比較図
- (18) 鈴木 武：国総研資料 No. 494、コンテナ船および RORO 貨物船の燃料消費量と長距離内航 RORO 貨物船輸送における燃料価格上昇の影響
- (19) 日本環境省、温室効果ガス排出量計算のための算定式及び排出係数一覧 (<https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc>)
- (20) 黒川 久幸、鶴田 三郎、嶋 邦彦、海上コンテナ輸送ネットワークの設計に関する研究：東・東南アジアを中心として、日本航海学会論文集 101 巻 (1999)
- (21) 各港湾の港務局の調査による
例 (東京港 <https://www.kouwan.metro.tokyo.lg.jp/business/zenpeji.pdf>)
- (22) 咸 曉黎、中国海運における港湾・船隊・船員に対する海事政策への提言に関する研究、2017
- (23) 咸曉黎・郭天淳・黒川久幸・鈴木理沙、北極海航路を用いた東アジアと欧州間のコンテナ輸送における二酸化炭素排出量の削減に関する研究、日本航海学会論文集、第 132 巻

- (24) 日本郵船調査グループ編、世界のコンテナ輸送と就航状況、2018 年度版、p. 40.
- (25) 出所 ONE : <https://jp.one-line.com/ja/routes/current-services>
- (26) 国際輸送ハンドブック 2019 年版、オーシャン・コマーズ、2019
- (27) 出所 CMACGM : <https://www.cma-cgm.com/>
- (28) 国際輸送ハンドブック 2019 年版、オーシャン・コマーズ、p. 1021.
- (29) 小門 武、コンテナターミナルのサービス水準、OCDI Quarterly 78、2009/Vol. 1, 2
- (30) 高 欢佳・牧野 秀成・古莊 雅生、AIS データを用いた沖待ち船舶の航行実態解析に関する研究、土木学会論文集 B3 (海洋開発)、Vol. 70, No2, 1_948-1_953, 2014
- (31) ロッテルダム港湾 HP (<https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/just-in-time-sailing-saves-hundreds-of-thousands-of-tonnes-of-co2>)
- (32) TNO : <https://www.tno.nl/en/>
- (33) ロッテルダム港 (野口美由紀) (公社)、LRO News Topics、日本海難防止協会ロンドン研究室、02/11/2018
- (34) MONTHLY CONTAINER REPORT (https://www.toepfer-transport.com/wp-content/uploads/2019/09/Toepfer-Container-Monthly-Report_2019_08-1.pdf)
- (35) 日本郵船、財務データ集、海運市況情報 (FACT BOOK II 2019) P8
(https://www.nyk.com/ir/library/fact/second/2019/_icsFiles/afieldfile/2020/01/31/200131fb2j.pdf)
- (36) 国土交通省 海事局 海事分野における SOX 規制の概要及び国土交通省の対応について (<https://www.jsanet.or.jp/environment/pdf/soxsymposium.pdf>) 2019. 04
- (37) 日本政策投資銀行 産業調査部、海洋環境規制強化を巡る船舶燃料市場の現状と展望 2018. 12
(https://www.dbj.jp/topics/region/industry/files/0000032459_file2.pdf)
- (38) BCG、Sharing the Costs of IMO 2020 Across the Ecosystem、2019. 10. 23
(<https://www.bcg.com/ja-jp/publications/2019/sharing-costs-imo-2020-across-ecosystem.aspx>)
- (39) 日本海事新聞、コンテナ船社/トランシップ増加へ。減速運航カバー。ドゥルーリー予測 2019. 03. 20 (<https://www.jmd.co.jp/article.php?no=244449>)
- (40) 川崎汽船株式会社、2018 年の環境活動実績と環境目標
(https://www.kline.co.jp/ja/csr/environment/data/main/03/teaserItems1/01/linkList/0/link/SHAREWITH2018KANKYOMOKUHYO_JP.pdf)
- (41) 国土交通省海事局、国際海運分野における GHG 削減対策～最近の国際動向と日本の方針～2019. 08 (<https://www.mlit.go.jp/common/001302145.pdf>)